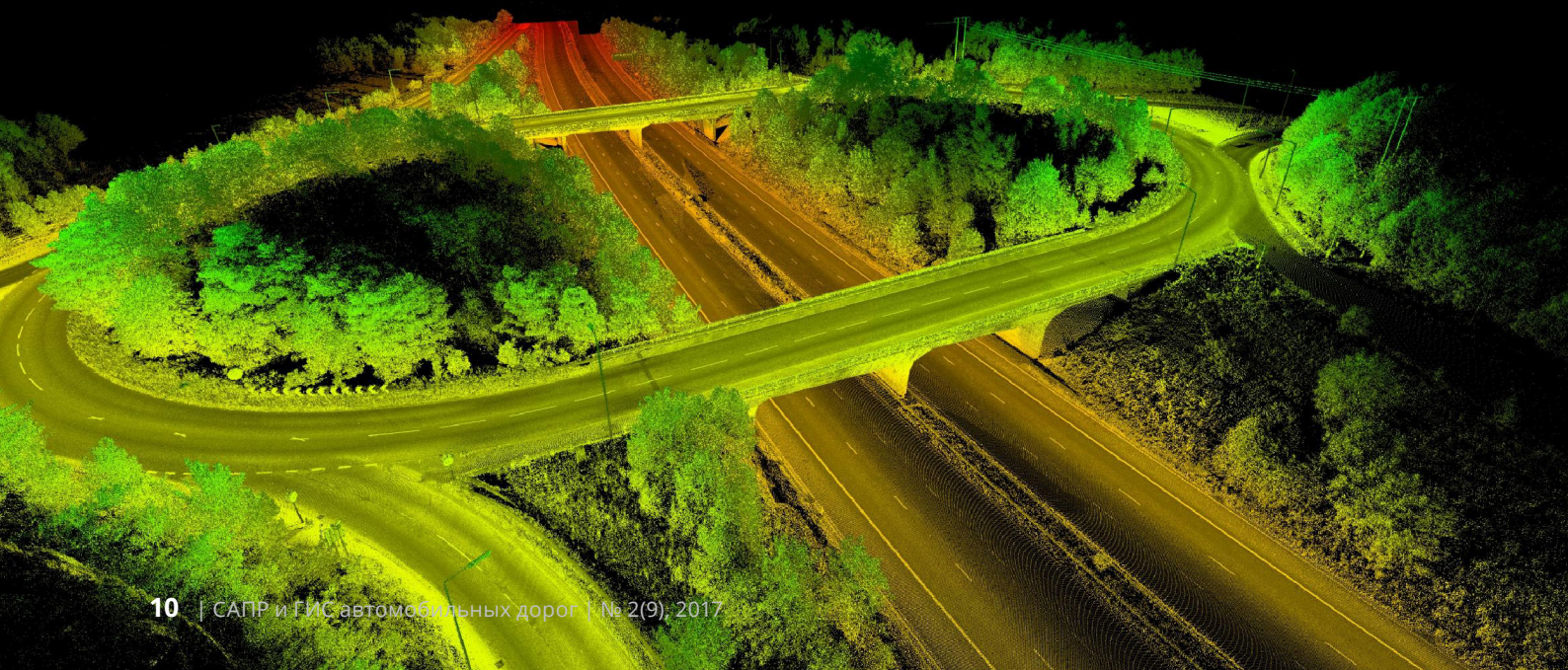


Программы для обработки данных лазерного сканирования местности

DOI: 10.17273/CADGIS.2017.2.2

Медведев В.И., руководитель отдела САПР ООО «ИндорСофт» (г. Томск)
Райкова Л.С., системный аналитик ООО «ИндорСофт» (г. Томск)



Рассматривается существующее многообразие программ, предназначенных для обработки облаков точек в масштабах местности — от демонстрационных утилит до сложных инженерных систем.

Введение

Лазерные сканеры успешно применяются уже несколько десятилетий в самых разных сферах — инженерных изысканиях, машиностроении, промышленной модернизации, архитектурной реставрации, дорожном строительстве, медицине. Ключевым преимуществом лазерного сканирования является максимальная детализация объекта, позволяющая принимать многие решения удалённо на основании только данных съёмки и таким образом экономить ресурсы, вплоть до удалённой работы вместо выезда специалистов на объект [1, 2].

Не является редкостью данная технология и в нашей стране: примерно с 2012 года на различных площадках активно обсуждаются потребности рынка, новые возможности, технологии, оборудование. И если поначалу проектировщики постоянно сталкивались с нехваткой необходимого инструментария для обработки результатов сканирования, а на тематических конференциях постоянно звучал вопрос: «Как сделать модель из облака точек?», сегодня для этих целей существует огромное количество программ, от небольших утилит до интеллектуальных систем с инновационными алгоритмами.

Обширный список программ можно найти даже в Википедии [3], и потому мы не будем повторяться и подробно описывать в статье поддерживаемые форматы данных, а ставим цель рассказать о сложившихся подходах, помочь читателю разобраться в огромном разнообразии программ и по возможности найти истоки этого разнообразия. В данной статье мы познакомим вас с основными идеями, приёмами и инструментами обработки облаков точек, реализованными в решениях зарубежного и отечественного рынка. Отдельное внимание мы уделим тем возможностям, которые будут полезны проектировщику автомобильных дорог.

Заранее оговоримся, что в зависимости от масштабов применения лазерной технологии принципиально различаются и сценарии обработки данных, и, соответственно, набор необходимых инструментов. Условно и очень грубо можно выделить два глобальных сценария. Первый — это *обратный инжиниринг*, применяемый в промышленности, архитектуре и медицине, где обычно идёт речь о построении меша либо сегментации и параметризации модели объекта с помощью примитивных форм [4, 5]. Второй сценарий — и это основная тема данной статьи — *создание цифровой модели местности (ЦММ)*. Здесь применяются в основном классификация и векторизация, а также постро-

ение триангуляции или меша в качестве модели рельефа. Такие этапы, как регистрация и анализ полученной модели, включая построение разрезов и проведение измерений, могут быть актуальны в любом случае.

Кроме того, съёмка местности может осуществляться различными способами, включая наземное, мобильное и воздушное лазерное сканирование, что также влияет на характер, масштаб и объём данных и, соответственно, инструменты обработки. Например, для мобильной и воздушной съёмки в формировании облаков точек и регистрации определяющую роль играет траектория ровера. Другой пример: моделирование зданий в воздушной съёмке всегда будет опираться на распознавание крыш, а при наземном и мобильном сканировании чаще придётся иметь дело с плоскостями стен.

Терминология

Для ясности и краткости определим перевод некоторых устоявшихся в специализированной зарубежной литературе терминов.

- **Скан (scan)** — данные лазерной съёмки, полученные в результате одного сеанса сканирования, связанные одной системой координат.
- **Карта расстояний (range image, organized point cloud)** — изображение, содержащее дополнительную координату расстояния от камеры; иногда называется *организованным облаком точек* (имеется в виду матричная организация точек).
- **Регистрация (registration)** — объединение разных сканов в одно облако точек в единой системе координат; иногда называется *уравнением*; следует различать с *импортом*.
- **Классификация (classification)** — назначение точкам облака атрибутивной информации в соответствии с типом объектов, которые они представляют; является формой представления результата *распознавания*. Также раскраска облака точек по классификации используется для лучшего зрительного восприятия данных.
- **Извлечение, векторизация¹ (extraction, vectorization)** — распознавание в облаке точек некоторой примитивной формы с последующей *параметризацией* (отрезок, плоскость, сфера, цилиндр) или сложной формы

¹ Термин «векторизация» неточен, поскольку исторически означает построение векторных объектов на основе отсканированного документа, представленного растровым изображением; в контексте лазерного сканирования исходные данные являются скорее векторными.

с последующим созданием объекта (ломаная, триангуляция, меш, сплайн).

- **Сегментация (segmentation)** — разбиение облака точек на ряд непересекающихся характерных областей, например, соответствующих примитивным формам (для дальнейшего извлечения) или типам объектов (подобно классификации). Реже означает разбиение на блоки для обработки больших объёмов данных.
- **Восстановление поверхности, создание меша (surface reconstruction, meshing)** — создание связанной модели поверхности по множеству точек, полученных на поверхности объекта или рельефе местности.
- **Цифровая модель рельефа, ЦМР (digital elevation model, DEM)** — цельная модель участка земляной поверхности в виде триангуляции или меша. Как правило, слова *рельеф* и *земля* выступают синонимами в контексте лазерного сканирования.
- **Цифровая модель местности, ЦММ (digital terrain model, DTM)** — модель местности, включающая в себя помимо модели рельефа объекты ситуации.
- **Меш (mesh)** — модель поверхности объёмного объекта в виде трёхмерной сетки из треугольников; может быть *замкнутым* (если объектом является тело, например цилиндр) либо иметь *внешнюю границу* (например, рельеф на участке местности).

Группа 1: ПО от производителей лазерных сканеров

Крупные производители лазерных сканеров (Leica, FARO, Riegl, Trimble), как правило, выпускают не только оборудование, но и программное обеспечение для передачи, просмотра и обработки данных, полученных со сканеров. В большинстве своём такое ПО решает стандартные задачи управления данными лазерного сканирования (импорт, экспорт), позволяет просматривать полученные данные, а также выполнять их первичную обработку: регистрацию, уравнивание, фильтрацию и построение поверхностей [6]. Полученные облака и поверхности затем могут быть экспортирова-

ны в общепринятые форматы обмена данными (LAS, XYZ и пр.) и переданы для последующей обработки в сторонние программы.

Наравне с самостоятельными программными продуктами производители лазерных сканеров часто разрабатывают плагины для крупных САПР (AutoCAD, Revit, MicroStation), позволяющие проектировщикам работать с облаками точек, используя привычный интерфейс и инструменты САПР. Такие плагины, как правило, имеют более широкий спектр возможностей и позволяют выполнять классификацию точек, распознавать типовые 3D-объекты (линии, трубопроводы) и строить поперечные профили по заданному шаблону.

1.1. Leica Cyclone 9 (Швейцария)

- Модульная структура программного обеспечения.
- Общий доступ к облакам точек по клиент-серверной технологии.
- Эмуляция процесса накопления топографических данных традиционными геодезическими приборами — «виртуальный топограф».
- Построение линий перелома по заранее заданным шаблонам.

Швейцарская компания Leica Geosystems, входящая в концерн Hexagon, является на сегодняшний день одним из крупнейших производителей оборудования для лазерного сканирования, геодезических изысканий и измерений. Для обработки данных лазерного сканирования она предоставляет целый комплекс модулей, объединённых в одной программной оболочке — Leica Cyclone. Набор модулей позво-

ляет выполнять полный цикл получения и обработки данных лазерного сканирования, начиная с управления процессом съёмки и регистрации облаков точек и заканчивая формированием 3D-моделей и выходных документов [7].

- Cyclone REGISTER и вышедшее в 2017 г. обновление REGISTER 360 — это модули, предназначенные для регистрации, т.е. сшивки облаков точек, снятых с нескольких точек сканирования, в единое облако точек в заданной системе координат. Регистрация возможна как по специальным визирным маркам различных форм и конфигураций, так и без них — посредством поиска связующих точек по общим характерным контурам в местах перекрытия отдельных сканов.
- Cyclone SURVEY содержит инструменты, необходимые геодезистам для документального сопровождения топографической съёмки: построение горизонталей, профилей и сечений, создание поверхностей в виде триангуляционных моделей, расчёт площадей и объёмов. Отдельно можно выделить инструмент Virtual Surveyor — «виртуальный топограф», — эмулирующий процесс накопления топографических данных традиционными геодезическими приборами, например тахеометром. Полученные данные (как правило, в текстовом формате) могут быть переданы в сторонние системы обработки геодезических данных.

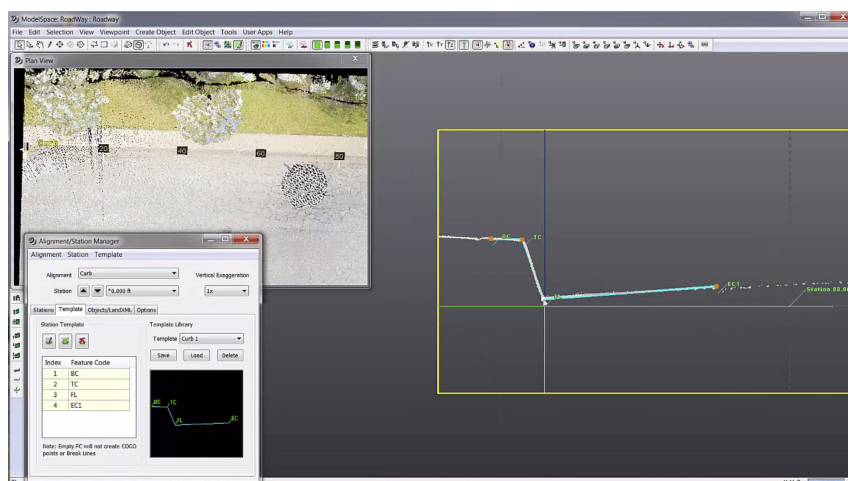


Рис. 1. Задание шаблона для распознавания линии перелома в Leica Cyclone

- Cyclone MODEL — расширенная версия Cyclone SURVEY, позволяющая формировать 3D-модели по облакам точек. В рамках проектирования дорог и искусственных сооружений полезными могут быть следующие функции.

- Построение линий перелома по заранее заданным шаблонам (рис. 1).
- Инструмент «умного» выделения, позволяющий с помощью специального окна просмотра выбирать точки под курсором по определённому критерию: ближайшие точки, точки с наименьшей или наибольшей высотной отметкой или точки земли. По выбранным точкам затем можно строить отрезки, ломаные и кривые. С помощью этого инструмента удобно строить линии верха и подошвы бордюра и прочие элементы дороги.
- Автоматическое получение контуров, сечений.
- Построение поверхностей как в виде мешей, так и в виде триангуляционной модели.

- В линейке продуктов Cyclone также предусмотрены вспомогательные модули, не предназначенные для обработки, но обеспечивающие просмотр и передачу данных лазерного сканирования (Cyclone BASIC, Cyclone IMPORTER) и общий доступ к облакам точек, моделям и прочим материалам сканирования по клиент-серверной технологии (Cyclone SERVER). Модуль Cyclone SERVER может также использоваться сторонними программами для обеспечения доступа к данным сканирования. Например, Cyclone SERVER используется для загрузки данных лазерного сканирования в САПР MicroSurvey CAD от компании MicroSurvey, которая, как и Leica Geosystems, является членом концерна Hexagon.

Демонстрационная версия доступна после регистрации на сайте разработчика.

1.2. Leica CloudWorx (Швейцария)

■ Семейство плагинов для большинства крупных САПР.

■ Автоматическое создание полилиний и дуг по указанным точкам.

■ Распознавание трёхмерных объектов: трубопроводов и стальных конструкций.

Отдельно следует отметить ещё одно решение от компании Leica — семейство плагинов CloudWorx. Плагины доступны практически для всех крупных САПР: AutoCAD, Revit, MicroStation, Nawisworks, 3DReshaper, PDMS (Plant Design Management System) [8]. Функционал плагинов немного различается в зависимости от возможностей и назначения системы. Для примера рассмотрим возможности плагина CloudWorx для популярной САПР AutoCAD.

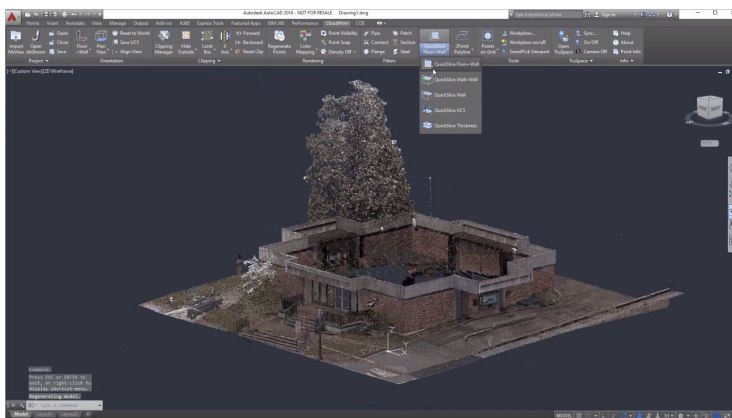


Рис. 2. Инструменты для построения срезов облака точек в CloudWorx для AutoCAD

Среди возможностей плагина можно выделить следующие.

- Быстрая навигация по большим облакам точек, построение сечений, срезов и обрезка облака точек (рис. 2).
- Инструменты автоматического создания 2D-полилиний и дуг по одной, двум или трём указанным точкам облака. Такими инструментами удобнее всего пользоваться в сочетании с возможностями по построению сечений — сначала строится сечение или срез облака, а затем по нему проводятся линии или кривые.
- Инструменты «умного» выделения точек лазерного сканирования по сетке и построения поверхностей по выбранным точкам.
- Инструмент автоматического распознавания 3D-моделей: труб, соединительных узлов, стальных конструкций — в основном актуален для распознавания трубопроводов, однако может быть применим и для работы с данными лазерного сканирования местности.

1.3. FARO Scene 7.1 (США)

■ Регистрация и уравнивание облаков «на лету» в полевых условиях.

■ «Умная» фильтрация и автоматическое удаление шумов.

■ Просмотр облаков с помощью технологии виртуальной реальности.

Компания FARO Technologies, основанная в 1981 г. в США, на данный момент является одним из лидеров на рынке высокоточных приборов для метрологии, измерений и лазерного сканирования. Компания также разрабатывает программное обеспечение, позволяющее выполнять обработку данных лазерного сканирования, полученных с собственных сканеров — FARO Scene.

Платформа FARO Scene в основном предоставляет функционал для ускорения начальной обработки облаков точек, автоматизации и со-

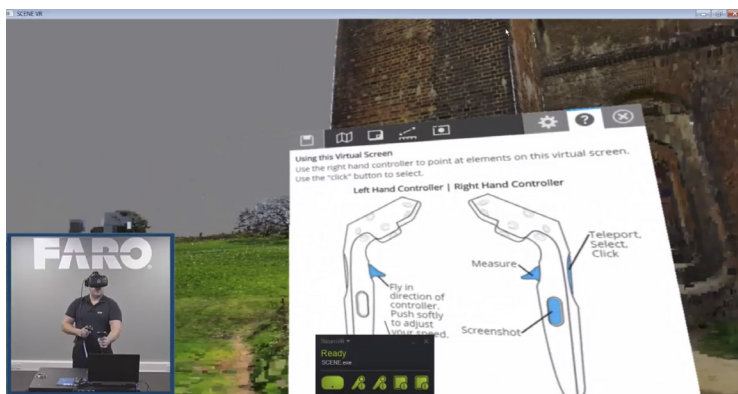


Рис. 3. Просмотр облака точек в виртуальной реальности в FARO Scene 7.1 Virtual Reality

кращения выполняемых вручную операций. Так, в выпущенной в 2017 г. версии FARO Scene 7.0 стала возможной регистрация облаков «на лету», то есть непосредственно в процессе съёмки на местности. Данные со сканера передаются по беспроводной сети на полевой ноутбук или компьютер, где выполняется уравнивание и регистрация сканов. Таким образом сокращается объём работ, выполняемых в камеральных условиях.

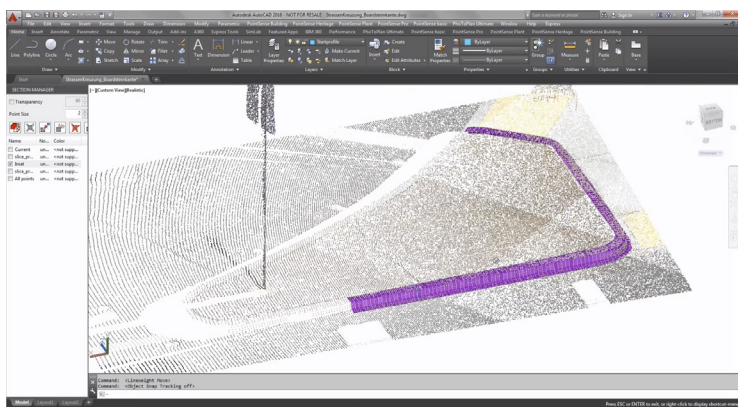


Рис. 4. Построение поперечных профилей по заданному шаблону с помощью FARO PointSense Pro

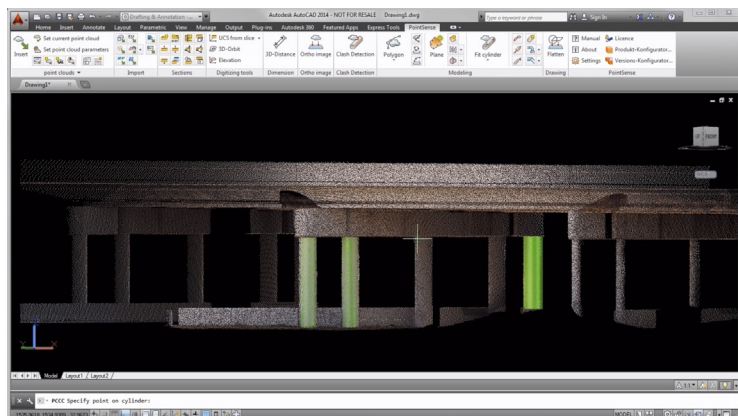


Рис. 5. Автоматическое распознавание цилиндров в FARO PointSense Pro

Сократить время обработки данных позволяют также возможности «умной» фильтрации облаков точек и удаления в автоматическом и полуавтоматическом режимах шумов, артефактов и прочих данных, не несущих значимой информации.

По полученным облакам можно быстро сформировать поверхность в виде триангуляционной модели или меша.

Кроме того, интересным симбиозом технологий выглядит возможность просмотра результатов лазерного сканирования с помощью очков виртуальной реальности. Такая возможность появилась в версии FARO Scene 7.1 Virtual Reality (VR) — в виртуальной реальности можно не только просматривать облака точек с наложенными детальными фотографическими текстурами, но также получать информацию по объектам, определять своё местоположение на карте и выполнять измерения в 3D (рис. 3).

Для того чтобы скачать пробную версию, необходимо зарегистрироваться на сайте компании-производителя. Кроме того, на сайте можно заказать демонстрацию любого программного продукта или оборудования FARO через интернет.

1.4. FARO PointSense (США)

- Сравнение облака точек с исходной моделью объекта.
- Автоматическое создание поперечных профилей.
- Распознавание трёхмерных объектов по встроенным шаблонам.

Компания FARO также предоставляет плагин, позволяющий работать с облаками точек в САПР AutoCAD и Revit — FARO PointSense. Изначально решение PointSense разрабатывалось компанией Kubit, однако в 2015 г. Kubit была куплена компанией FARO, которая и продолжила развитие системы [9].

Плагин PointSense представлен на рынке в нескольких версиях: Plant (для промышленности), Building (для архитектуры и строительства) и Heritage (для работы с объектами культурного наследия). Помимо этого, существует универсальная версия Pro, объединяющая в себе возможности остальных версий.

PointSense Pro предполагает работу с уже предварительно обработанными — уравненными и геопривязанными — облаками точек. Плагин обеспечивает выполнение всех операций, обязательных для такого рода программ: построение сечений и срезов, выполнение измерений, формирование поверхности (в виде триангуляции) и вычисление объёмов. Предусмотрена также «умная» привязка к линиям перелома, углам и краям объектов.

Также в PointSense Pro реализован ряд интересных функций, которые могут быть применимы в дорожном проектировании. Среди них можно выделить следующие.

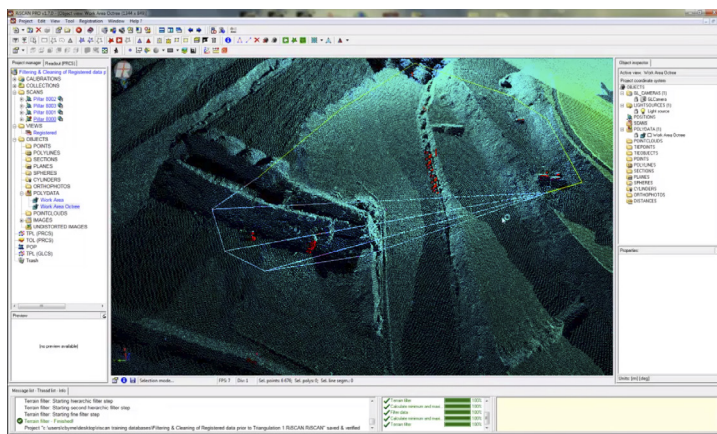


Рис. 6. Фильтрация облаков точек в RiScan Pro

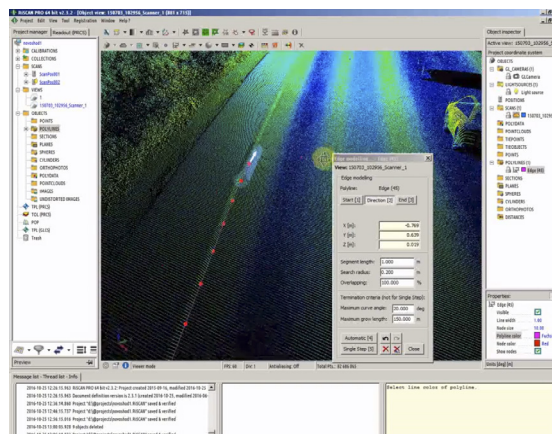


Рис. 7. Автоматическое распознавание линии края дороги по бордюру в RiScan Pro

- Автоматическое создание поперечных профилей — по заранее заданному шаблону и оси трасы система создаёт поперечные профили и формирует по ним поверхность (рис. 4).
- Анализ деформации и повреждений путём сравнения облака точек и исходной модели и визуализации отличий в виде карты высот.
- Распознавание 3D-элементов по заданным шаблонам (рис. 5).
- Обнаружение коллизий проектируемых моделей и облака точек.

1.5. Решения от Riegl (RiScan Pro, RiProcess) (Австрия)

- Отдельные продукты для обработки данных наземного и мобильного сканирования.
- Автоматическое распознавание бордюров.
- Создание геометрических объектов по точкам лазерного сканирования.

Компания Riegl наряду с вышеперечисленными Leica Geosystems и FARO Technologies является одной из крупнейших компаний, выпускающих оборудование для лазерного сканирования. Компания предлагает инженерам несколько линеек лазерных сканеров (наземных, мобильных и воздушных), а также линейку ПО, позволяющую управлять процессом сканирования, выполнять анализ и первичную обработку данных, полученных в результате различных способов сканирования.

Так как процесс мобильного лазерного сканирования имеет свои особенности, для обработки, анализа и визуализации данных мобильного и воздушного лазерного сканирования предусмотрена отдельная система — RiProcess. По сути, она представляет собой набор следующих модулей.

- RiAcquire — служит для управления процессом мобильного лазерного сканирования и получения данных сканирования.
- RiAnalyze — применяется для воздушного лазерного сканирования; помимо управления

процессом сбора данных она выполняет анализ поступающего сигнала и пересчёт геометрических данных в прямоугольную систему координат.

- RiSolve — выполняет регистрацию облаков точек и раскрашивание в истинные цвета.
- RiWorld — выполняет объединение данных лазерного сканирования и данных траектории, координатное преобразование данных, привязку к географическим координатам.

На выходе получаются облака точек в координатах WGS84 или UTM. Эти облака затем можно передать в систему RiScan для дальнейшей обработки. Система RiScan также применяется для обработки данных наземного лазерного сканирования.

Среди возможностей системы можно выделить следующие.

- Регистрация сканов на основе точек привязки и контрольных точек, ручная регистрация (вращение и перемещение сканов вручную), а также автоматическая регистрация на основе данных интегрированного GPS-приёмника, датчиков наклона и компаса сканера.
- Фильтрация точек по диапазону плотности, интерполяция недостающих точек из смежных данных (рис. 6).
- Построение поверхностей и наложение текстуры, созданной на основе фотоснимков высокого разрешения.
- Автоматическое создание линий края дорожного покрытия по бордюроному камню (рис. 7).
- Создание различных геометрических объектов по точкам лазерного сканирования: точек, линий, цилиндров, плоскостей.

Скачать пробные версии программных продуктов Riegl можно на сайте компании. Для этого необходима предварительная регистрация.

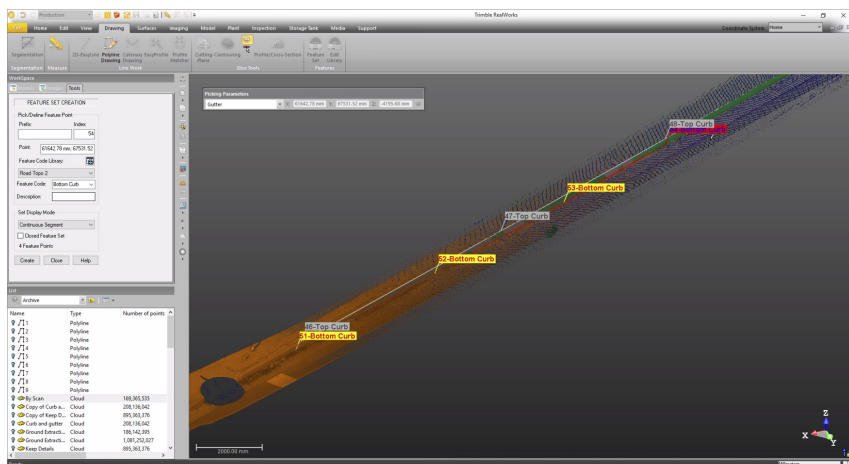


Рис. 8. Привязка к точкам верха и низа бордюра в RealWorx

1.6. Trimble RealWorx 10.4 (США)

- «Умная» привязка к линиям верха и низа бордюра.
- Отдельный модуль для трёхмерного моделирования объектов.
- Сравнение объектов съёмки с их моделями и выявление отклонений.

Американская компания Trimble Navigation специализируется на производстве геодезического оборудования, спутниковых приёмников и лазерных сканеров, а также разрабатывает программное обеспечение для обработки данных лазерного сканирования — систему Trimble RealWorx.

Система предоставляет все необходимые функции по управлению, просмотру и первичной обработке данных. Разработчики заявляют, что RealWorx позволяет эффективно работать с очень большими объёмами

данных благодаря режиму частичной загрузки данных.

- Выполнение регистрации сканов в полностью автоматическом режиме (как с помощью марок, так и по характерным точкам), оценка качества привязки по маркам и формирование отчётов о сшивке сканов.
- Выполнение интеллектуальных измерений, полуавтоматической очистки, построение сечений и срезов.
- «Умная» привязка, позволяющая привязываться к точкам с наибольшей и наименьшей высотной отметкой, верху и низу бордюра (рис. 8).
- Формирование поверхности по облаку точек в виде триангуляции и подсчёт объёмов.

- Инспектирование — количественный анализ, картирование и визуализация отклонений между объектами съёмки. Эта функция используется для сравнения данных сканирования с проектом или для выявления изменений геометрии объекта с течением времени.

Кроме того, существует комплектация системы, включающая модуль Modeling, позволяющий строить на основании точек лазерного сканирования различные трёхмерные геометрические формы: цилиндры, конусы, плоскости. Основная сфера применения модуля — моделирование технологических комплексов для создания проектной документации, контроля и модернизации существующего оборудования.

Скачать демонстрационную версию RealWorx можно на сайте компании-разработчика.

Группа 2: независимые решения

Во второй группе собраны самостоятельные программы, представленные как «старожилом» рынка Terrasolid, так и множеством более молодых, но очень амбициозных разработок, а также плагины, написанные для больших САПР независимыми командами. Все эти программы изначально создавались именно для обработки лазерных данных, причём без привязки к конкретной сканирующей аппаратуре. Таким образом, разработчики были вольны сами определять интересные отрасли, круг задач и, соответственно, инструментарий, который позволил бы все эти задачи эффективно решать.

2.1. Terrasolid TerraScan для Microstation (Финляндия)

Компания Terrasolid, официально зарегистрированная в 2012 г. в Финляндии, на самом деле занимается разработкой ПО для обработки изысканий ещё с 1995 г., а сегодня наиболее известна как разработчик программного комплекса Terrasolid, ориентированного на обработку данных мобильного и воздушного лазерного сканирования. Комплекс включает множество MDL-плагинов для платформы Bentley Microstation с приставкой «Terra» в названии. Среди них особо полюбили отечествен-

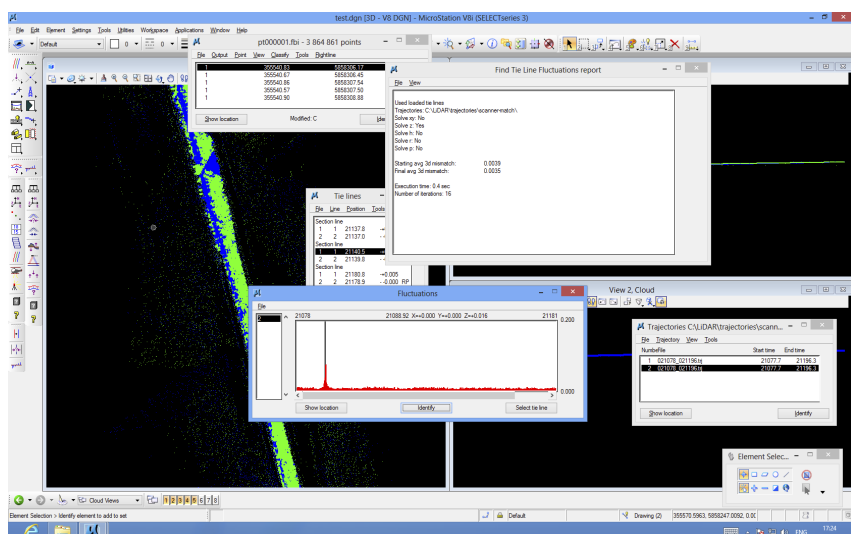


Рис. 9. Процесс уравнивания (регистрации) сканов мобильной лазерной съёмки в TerraMatch

ным пользователям TerraScan для классификации и моделирования на основе данных лазерных изысканий и TerraMatch для уравнивания фрагментов съёмки.

Пользовательский интерфейс каждой из программ представлен одной инструментальной панелью с несколькими вложенными группами команд. Для каждой команды открывается своё плавающее окно, и при реальной работе общее количество открытых окон, не считая видовых, может сбить с толку (рис. 9). Учитывая, что у каждого окна также есть свои меню и команды, становится тяжело запомнить, где именно находится нужная в данный момент функция.

Плагин TerraMatch позволяет уравнивать облака одним из стандартных способов: по форме (find match) или по точкам соответствия и специальным меткам (find tie lines). В любом варианте есть особенности, призванные учесть специфику данных мобильного и воздушного лазерного сканирования и делающие программу в своём роде уникальной. Первая: коррекция выполняется не для сканов напрямую, а для точек траектории ровера, поскольку точки облака являются производными по отношению к траектории съёмки [10]. Вторая особенность заключается в возможности локального уравнивания на каждом участке линейно-протяжённых сканов (find fluctuations) для тех случаев, когда точки траектории имеют большие ошибки на отдельных участках, например, из-за крон деревьев над дорогой, мешающих качественному приёму ГНСС-сигнала.

Работа в TerraScan выполняется по следующему сценарию. Первым делом создаётся проект и настраиваются системы координат, форматы входных и выходных данных, а также профили лазерных сканеров. Отдельно следует отметить, что для оптимизации вычислений система работает с целочисленными координатами (до 10 значащих цифр в числе), поэтому при работе с большими координатами (миллионы метров — это 7 цифр) и миллиметровой точностью (ещё 3 цифры) приходится аккуратно выставлять центр координат, иначе часть выпадающих точек будет проигнорирована.

На втором этапе импортируются облака точек и траектории. Сначала выполняется быстрый импорт сильно прореженного облака точек, производится визуальная оценка и проверка адекватности данных. Затем полный — облако разбивается на невидимые блоки, которые подгружаются в оперативную память только при необходимости.

Третий этап — это обработка данных, которая применяется поблочно. Среди команд обработки доступна классификация земли, точек-выбросов, зданий, растительности, характерных точек, наконец, сглаживание, прореживание и экспорт. Предусмотрена пакетная обработка: достаточно один раз написать макрос, включающий десятки предварительно настроенных команд, и затем применять его к очередному проекту.

В целом программный комплекс Terrasolid обладает серьёзным потенциалом для обработки большого объёма реальных данных лазерного

сканирования, однако отталкивает дороговизной, запутанным графическим интерфейсом, необходимостью совершения множества подготовительных действий и некоторой архаичностью.

Для ознакомления с продукцией Terrasolid необходимо сначала получить 14-дневную демоверсию системы Microstation, оставив запрос с указанной электронной почтой на сайте Bentley, далее установить интересные плагины с сайта Terrasolid, при первом запуске заполнить регистрационную форму и дожидаться одобрения заявки, при этом условия пробного периода заранее неизвестны.

2.2. Technodigit 3DReshaper 2017 (Франция)

Серию молодых программ в нашем обзоре открывает приложение 3DReshaper, созданное в 2005 г. для выполнения 3D-изысканий с применением современной измерительной и сканирующей аппаратуры. Разработчиком является французская компания Technodigit, которая с 2009 г. входит в мировой концерн Hexagon. Программа поставляется как самостоятельное приложение с различными расширениями, в качестве плагина для САПР, а также как условно-бесплатная библиотека с SDK для встраивания в другие САПР-платформы.

Программа имеет достаточно простой пользовательский интерфейс (рис. 10): основное окно является рабочим 3D-видом, в верхней части окна расположена ленточная панель инструментов, а все настройки и действия для текущей команды отображаются на форме слева.

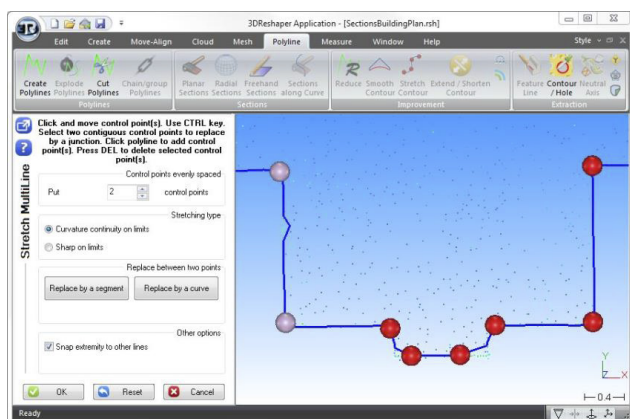


Рис. 10. Извлечение контура здания методом натяжения нити в 3DReshaper

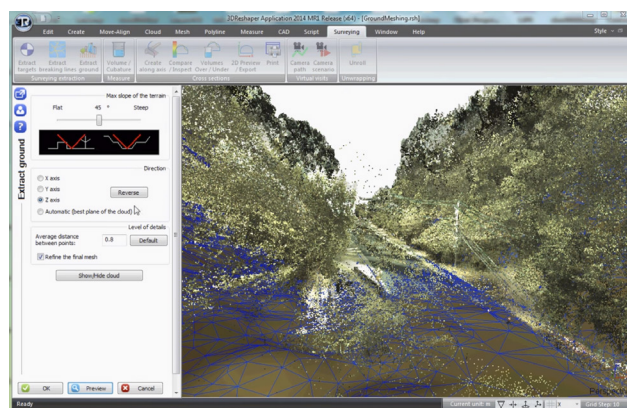


Рис. 11. ЦМР, подготовленная в 3DReshaper с помощью модуля Surveying

Рабочий процесс в 3DReshaper выглядит следующим образом: выполняем или импортируем измерения, на их основе формируем и улучшаем меш, который затем анализируем или экспортируем. Тем не менее в базовой версии программы есть множество инструментов для работы непосредственно с облаками точек.

- Импорт/экспорт облаков точек в большинстве известных форматов (CSV, XYZ, LAS и другие).
- Регистрация со взаимной увязкой по геометрии или специальным меткам (вкладка Move-Align).
- Ручное и автоматическое выделение точек для удаления, раскраска, удаление точек-выбросов, разбиение на подоблака (вкладка Cloud).
- Распознавание в облаке примитивов, плоских контуров, сравнение облака с мешем (вкладка Measure).
- Команды для построения сечений по мешу или облаку точек, удобной обводки линиями (например, план здания); автоматизированное распознавание линии изгиба поверхности (feature line), линий по обе стороны от изгиба (border lines), а также линии, воссоздающей острое ребро (fictive line) — такие операции особенно удобны для воссоздания архитектурных форм (вкладка Polyline).

Вкладка Mesh позволяет создать меш по облаку точек с опциональным удалением точек-выбросов, заполнением пробелов и созданием замкнутого тела по одному из предложенных сценариев.

- Регулярная выборка: на облако накладывается сетка, в каждой ячейке которой для меша выбирается наиболее характерная точка. Недостатком метода является компромисс между недостаточной детализацией участков сложной формы и избыточной детализацией относительно плоских участков.
- Двухэтапный алгоритм: сначала строится грубый регулярный меш, в который для детализации добавляются характерные точки из числа исходных (если измерения точные) либо интерполированных точек облака (если данные зашумлены).

Однако этим возможности программы не ограничиваются. Так, для

подготовки модели местности предназначен отдельный плагин Surveying (рис. 11), позволяющий создать меш земляной поверхности, автоматически распознать линии перелома поверхности, построить ряд сечений и измерить отметки и объёмы относительно заданной модели.

Есть и другие специализированные плагины, например Dental для медицинских и CAD для промышленных целей. Если и этих функций окажется недостаточно, разработчики предлагают использовать плагин Script для написания собственных команд и макросов.

На официальном сайте доступна 30-дневная пробная версия, в которой ограничено количество сохранений. Для получения активационного кода необходимо отправить запрос.

2.3. VirtualGrid VRMesh 9.5 (США)

- Широкий функционал для обратного инжиниринга и изысканий на местности.
- Встроенные макросы для пакетной обработки.
- 30-дневная пробная версия, документация в файле, отзывчивая техподдержка.

По информации с официального сайта, первая версия программного продукта VRMesh увидела свет в 2004 г. и предназначалась для эскизного 3D-моделирования [11]. Уже через год появилась возможность работы с облаками точек, а сегодня программа предлагает практически полный инструментарий для обработки данных лазерного сканирования, в том числе для целей дорожного строительства.

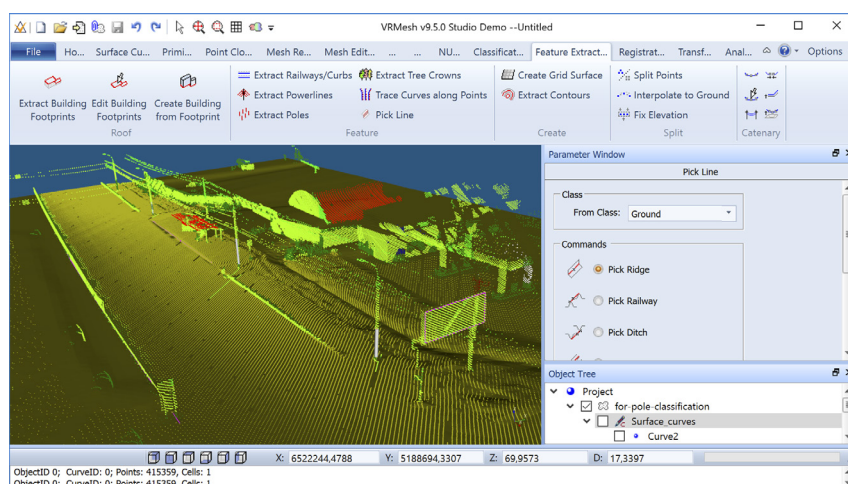


Рис. 12. Классифицированное облако точек, построенная ЦМР, распознанные опоры освещения и рекламный щит в VRMesh 9.5

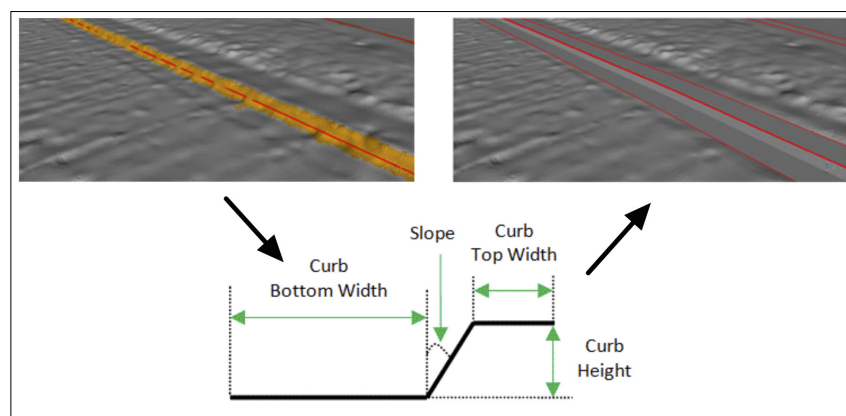


Рис. 13. Врезка модели бордюра в меш с помощью инструмента Fit curbs в программе VRMesh

Программа написана на языке C++ с использованием кроссплатформенного фреймворка Qt и библиотеки визуализации VTK, но выпускается только для ОС Windows. Главное меню VRMesh выполнено в современном ленточном стиле и содержит очень большое количество закладок и команд (рис. 12). В центральной части расположен рабочий 3D-вид, справа — настройки текущей команды и дерево проекта.

Существует три варианта поставки программы: Reverse, Survey и Studio. Конфигурация Reverse предназначена для обратного инжиниринга и содержит всё необходимое для меш-моделирования, от регистрации сканов с удалением шума до текстурирования. В конфигурации Survey, напротив, упор сделан на операции, полезные для обработки изысканий на местности, то есть распознавание объектов и классификацию. Наконец, вариант Studio объединяет все возможные функции в одной программе.

При импорте больших облаков выполняется разбиение на блоки и создание поисковых индексов, которые сохраняются в файле собственного формата PCP. Программа автоматически определяет, являются ли данные съёмкой местности, и предлагает оптимизировать поисковые индексы в зависимости от типа съёмки: в этом случае исключается разбиение по Z-координате. Небольшие облака можно подгружать напрямую в оперативную память.

В зависимости от конфигурации будут различаться и сценарии работы. Первый вариант — через построение меша, в том числе для создания ЦМР. Для удобства огромное разнообразие необходимых команд оформлено в виде пакетных операций. *Мастер построения сетки* (Point cloud to mesh wizard) поможет настроить и применить в правильном порядке прореживание и устранение шума в облаке, создание сетки, удаление островных частей, упрощение сетки, склейку швов, заполнение пробелов и фьордов (протяжённых разрывов поверхности), проверку нормалей и сглаживание. Присутствует адаптация для создания меша по данным традиционной геодезической съёмки. Другая пакетная операция — *мастер анализа и исправления сетки* (Mesh analysis wizard) — позволяет обнаружить и при

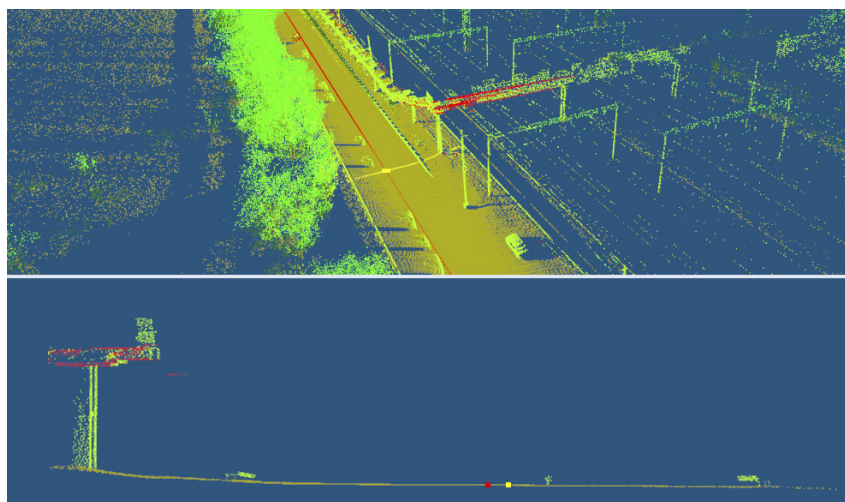


Рис. 14. Уточнение положения узла осевой линии в поперечном разрезе в VRMesh

необходимости исправить возможные ошибки в структуре меша, такие как граничные и короткие рёбра, рёбра с третьей гранью, сложенные, перекрывающиеся, перевёрнутые, острые и длинные треугольники, целые части сетки с избыточными связями.

Полученный меш можно далее разрезать, склеивать, выполнять над ним логические операции, сглаживать, упрощать, уплотнять, делать фаски и острые грани, добавлять поверхности заметания (вкладка Mesh editing); также доступны популярные среди 3D-художников приёмы лепки (вкладка Clay). Наконец, в меше можно выделять области интереса с помощью кисти и затем применять перечисленные операции только к помеченным областям или распознавать локально линии и контуры, создавать текстуры (вкладка Mark). Здесь отдельного внимания заслуживает многоэтапная команда подгонки бордюра по сетке (Fit curbs): сначала по уклону выявляются и помечаются области бордюров, которые можно подправить вручную, а затем для каждого объекта в соответствии с настройками создаются четыре линии, образующие поверхность бордюра (рис. 13).

Второй сценарий работы в VRMesh предполагает взаимодействие напрямую с облаком точек. Отличия конфигурации Survey проявляются уже на этапе регистрации: здесь можно импортировать траекторию ровера, чтобы разбить исходное облако на отдельные сканы (Separate LiDAR strips),

которые уравниваются уже общими командами ручной или автоматической регистрации (применяется поиск перекрывающихся областей и метод наименьших квадратов).

Обработку облака точек удобнее выполнять с помощью пакетной операции под названием *мастер изысканий* (Survey wizard), где перечислены команды классификации растительности, крыш зданий, точек рельефа, точек над рельефом, изолированных точек, плоской дорожной поверхности и другие, а также автоматической векторизации зданий, рельс, бордюров, линий электропередачи, опор, крон деревьев, выделенных полос точек. Отдельно следует отметить возможность классификации по данным фотосъёмки, построение регулярной сетки или изоконтуров в качестве упрощённой ЦМР (Create grid surface).

Извлечение линии в полуавтоматическом режиме выполняется в один клик мыши по одному из шаблонов (Pick line): хребет, рельса, канава, дорожная разметка, опора, ЛЭП. Точная оцифровка линий дороги обычно выполняется с помощью специальных *цепных линий* (Catenary string). При этом открывается окно разреза, где можно уточнять положение отдельных узлов линии кликом мыши, а навигация осуществляется с помощью колеса мыши или в окне плана (рис. 14).

Практически все команды векторизации создают двумерные формы, такие как линии и окружности. Например, при автоматическом поиске опор освещения создаются не

цилиндры, а только вертикальные отрезки. Однако после этого можно применить команду классификации по тоннелю (Classify by tunnel), чтобы выделить точки опоры в отдельный класс. Далее можно в полуавтоматическом режиме построить по выделенным точкам и сам цилиндр. Подобным образом можно классифицировать точки на заданном удалении от линии или соответствующие произвольной форме.

После всех построений можно измерять углы, длины, площади, объёмы, отклонения и интервалы, в том числе работая в сечениях, построенных с заданным шагом, выгружать отчёты измерений в PDF; выполнять раскраску меша или облака точек по критериям кривизны, уклона, толщины слоя и другим (вкладка Analyze).

Из недостатков программы можно отметить «капризный» импорт, который не принимает кириллические имена файлов, а в случае с текстовым файлом предлагает на выбор строго определённые наборы полей, а также не совсем удобные инструменты для работы в разрезах. Кроме того, пакетные операции склонны создавать копию облака точек, из-за чего рабочая папка быстро наполняется множеством тяжёлых PCP-файлов.

Для любой конфигурации программы доступна 30-дневная демоверсия, в которой запрещены функции экспорта. Для скачивания пробной версии достаточно указать электронный адрес.

2.4. GeoPlus VisionLidar 2018 (Канада)

- Развитые возможности для изысканий и трассирования, удобная работа в сечениях.
- Новаторский подход к классификации с помощью кластеризации.
- Дополнительные специальные возможности для воздушной и мобильной лазерного сканирования.
- Бессрочная пробная версия, онлайн-документация.

Канадская компания GeoPlus ведёт свою историю с 1987 г. и известна программными решениями для землеустройства и гражданского строительства. Совсем недавно компания выпустила новый продукт VisionLidar, призванный восполнить пробел, который образовался в связи с появлением массивных лазерных данных, включая

воздушную, наземную и мобильную съёмки. Сегодня программа уже нашла успешное применение в муниципальных и частных организациях Канады и других стран.

Программа VisionLidar написана на языке C++ с использованием кроссплатформенной библиотеки OSG. Имеет простой на первый взгляд пользовательский интерфейс, выполненный в классическом стиле (рис. 15). Узкая панель инструментов содержит базовые команды управления проектом, навигации, выполнения измерений и трансформации. Основные же действия и команды доступны через системное меню. Однако структура меню не имеет стройной логики, кроме того, многие команды представлены более сложными окнами с множеством параметров и таблицами, и в таких случаях приходится обращаться к онлайн-документации.

Модель проекта содержит облака точек, а также векторные объекты, включая поверхности, точки, линии, трассы, профили и примитивы. При импорте для каждого облака точек создаются файл данных в собственном формате VPC, файл с поисковым индексом VPI, а также ряд последовательно упрощённых облаков в виде пар файлов VPC и VPI для быстрого отображения на экране. Векторные объекты хранятся в базе данных под управлением Microsoft Access (MDB) или SQLite. Управление видимостью отдельных классов точек, типов и элементов осуществляется с помощью окна Explorer.

Полностью автоматической обработке облака служат команды меню Analyze: классификация точек земли, зданий, растительности и шума (под шумом в программе понимаются точки-выбросы); распознавание пло-

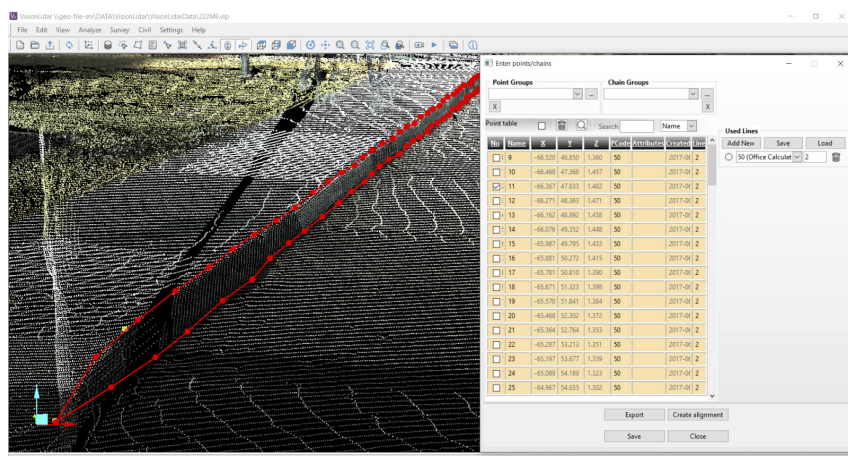


Рис. 15. Результат автоматизированного распознавания верхней и нижней кромок бордюра в VisionLidar

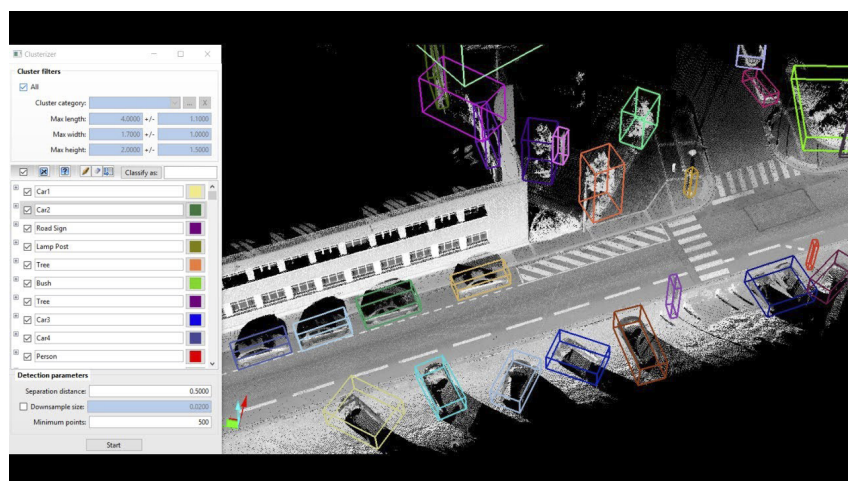


Рис. 16. Кластеризация дорожных объектов в облаке точек в VisionLidar

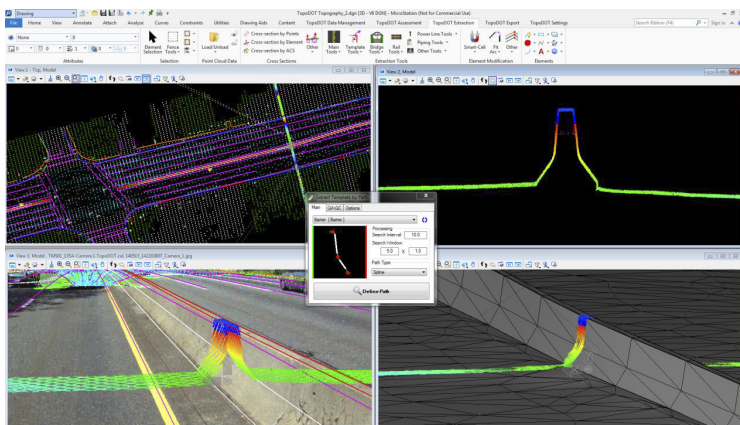


Рис. 18. Использование «умных ячеек» для распознавания барьерных ограждений в TopoDOT

несколько окон, просматривая результаты лазерного сканирования и панорамной фотосъёмки одновременно в нескольких проекциях.

ТороDOT предоставляет очень широкий спектр инструментов, которые можно применять для выделения рельефа местности и автоматического распознавания поверхности дороги.

- Автоматический поиск оси дороги. Ось дороги определяется по центральной линии дорожной разметки (разделительной полосе), которая распознаётся по интенсивности отражённого луча лазера.
- Автоматическое распознавание линий дороги. Инструменты ТороDOT позволяют с высокой точностью восстановить поверхность дороги, распознавая линии перелома, бордюры и тротуары. Характерным точкам лазерного сканирования в поперечном сечении можно назначать семантику (край проезжей части, бордюр, верх бордюра), а затем в автоматическом режиме строить по ним линии дороги (рис. 17).

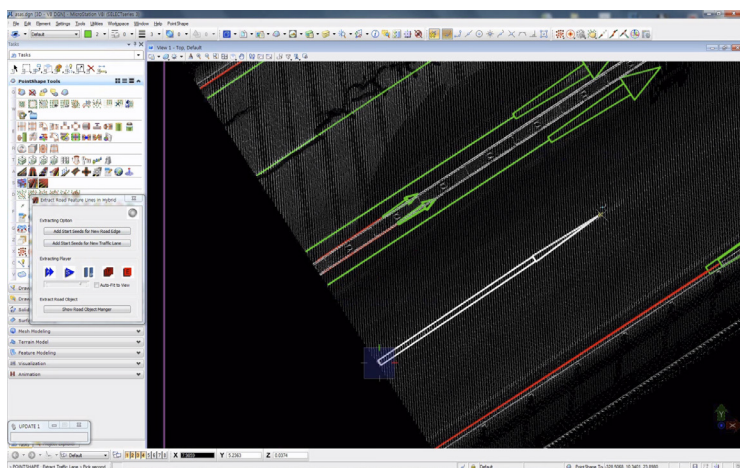


Рис. 19. Подготовка к массовому извлечению конструктивных линий дороги и дорожной разметки в плагине PointShape Advanced для Microstation

- Технология быстрого моделирования трёхмерных объектов. Повторяющиеся объекты сложной формы (например, деревья, опоры ЛЭП, столбы освещения) можно моделировать с помощью «умных ячеек», масштабируемых типовых форм, которые можно извлечь из поперечного сечения облака и отредактировать по своему усмотрению. Такие формы автоматически распознаются в облаке точек. Также «умные ячейки» можно использовать для моделирования линейно-протяжённых объектов сложной формы, например барьерных ограждений — ячейки могут соединяться друг с другом с привязкой по заданным векторам (рис. 18).
- Извлечение рельефа местности на территориях с густой растительностью. По сетке высот определяются точки с наименьшей высотной отметкой, а затем по ним строится поверхность. Инструмент не требует предварительного удаления шумов или классификации облака точек.
- Оценка коллизий и прохождения транспортных средств. Пользователь может задать модель транспортного средства и смоделировать его прохождение по дороге или тоннелю.

Пробная версия доступна по запросу. Для того чтобы получить её, необходимо заполнить форму на сайте Certainty 3D.

2.6. DreamT&S PointShape Advanced для AutoCAD/Microstation (Южная Корея)

Южнокорейская группа разработчиков DreamT&S известна с 2005 г. своим плагином для платформ AutoCAD и Microstation под названием PointShape. Программа поставляется в трёх вариантах: Surveyor для регистрации сканов и анализа отклонений от формы исходной модели, Advanced для решения основного спектра задач, и Advanced with Tunnels — с добавленными функциями обработки лазерной съёмки тоннелей. Основной функционал программы был сформирован примерно к 2012 г.

Пользовательский интерфейс версии PointShape Advanced заключается во вкладках на главной панели и главном меню. Инструменты сгруппированы по области применения, это общие инструменты, обрезка облака, построение сечений, промышленные конструкции (Plant), строительные конструкции (Building), дорожные объекты (Road), объёмные примитивы, эскизное рисование плоских фигур (2D Sketch) и тоннели (Tunnel Survey).

Режимы изысканий, представленные в программе, не повторяют ни одно из известных решений, поэтому остановимся на них подробнее. Первый тип команд в строительной группе — это серийное распознавание по образцу (Arrange by profile), взятому из библиотеки. Принцип работы следующий: сначала указывается линия пути,

например кромка дороги, затем объект-образец, например сигнальный столбик, и границы расстановки, то есть начальный и конечный пикет. Программа автоматически распознаёт экземпляры объекта вдоль пути и создаёт соответствующие копии объекта. Можно наложить ограничения на поворот копии. Также возможно распознавание сразу группы объектов, например секции декоративного ограждения. Встроенная библиотека уже содержит множество объектов, таких как опора освещения, светофор, разметка пешеходного перехода и направлений движения, дорожный знак, люк и даже мост.

Команда вертикального моделирования позволяет построить набор горизонтальных сечений вертикального объекта по сечению-образцу. Сечения подгоняются по масштабу, и далее по ним создаётся 3D-модель объекта. Более привычен режим извлечения характерной линии (feature line), который шаг за шагом по указанному начальному участку наращивает линию, например, провода ЛЭП.

Не менее интересны режимы на дорожной панели инструментов. Для извлечения бордюра (road edge) нужно указать начало и конец участка на углу бордюра, затем боковую и верхнюю поверхность бордюра. Программа автоматически создаёт линию кромки бордюра с возможностью дальнейшего разрезания, склейки и обрезки. Режим позволяет распознавать и другие линии перелома поверхности в виде ломаной или B-сплайна. Дорожную разметку можно извлекать с использованием данных интенсивности сигнала в автоматическом и пошаговом

режимах (traffic lane). Когда найдены краевые полосы, можно получить ось дороги как среднюю линию, спроецированную на облако (central line). Для визуального различения конструктивные линии дороги отображаются красным, а линии разметки — зелёным цветом (рис. 19).

Поверхность проезжей части создаётся в виде триангуляции на основе регулярной сетки по одному из множества сценариев: программе для построения достаточно знать, например, только линию пути и образующие точки поперечного сечения (break line) или границы проезжей части — от одной кромки на заданную ширину (Road by 1 profile), от кромки до другой кромки (Road by 2 profiles) или границы перекрёстка (Crossroad) или просто указать выделенную область (Grid mesh). При возможности алгоритм сам находит точки перелома, проводя по ним структурные линии кромок или бордюра в дополнение к созданной поверхности. Подобным образом работает и команда проецирования: можно использовать линию траектории ровера, чтобы спроецировать её на проезжую часть, и извлечь сразу поверхность с выраженными кромками.

Таким образом, можно смело утверждать, что плагин PointShape обладает передовыми инструментами по части восстановления поверхности дороги. Недостатком программы можно назвать отсутствие алгоритмов классификации, которое может помешать получению качественного результата на реальных данных.

Пробная версия PointShape Advanced доступна для скачивания после регистрации на официальном сайте.

При запуске потребуется ввести активационный код.

2.7. Undet for SketchUp V2.1 и Undet для AutoCAD V2.4 (Литва)

Примером очень простой утилиты для работы с облаками точек могут послужить плагины, написанные литовскими разработчиками из компании Undet для системы 3D-моделирования SketchUp, а также для САПР AutoCAD. Следует сразу сказать, что это два модуля с общим геометрическим ядром, но различающимися интерфейсами и наборами функций, поэтому рассмотрим их по отдельности.

Модуль Undet для SketchUp предназначен для оцифровки облаков точек в этом удобном редакторе. Интерфейс дополняется плавающими инструментальными окнами, наибольший интерес среди которых представляет панель функций извлечения (Undet References). В простейшем случае можно обводить облако с помощью линий и других примитивов или же воспользоваться одной из более «умных» команд: аппроксимировать плоскую область прямоугольником, построить меш вблизи найденной плоскости по заданному допуску кривизны, найти по двум плоским областям двугранный угол и обозначить его отрезком. Основное преимущество заключается в том, что даже произвольный прямоугольник, распознанный в нужной плоскости, легко доработать до требуемой плоской или объёмной формы средствами самого SketchUp (рис. 20).

В случае с AutoCAD пользовательский интерфейс Undet представлен вкладкой на главной панели и собственным окном свойств. Основные панели инструментов соответствуют функциям управления сечениями, распознавания примитивов, построения поверхностей и анализа деформаций. Создание поверхности возможно с помощью обыкновенного и направленного мешей. Во втором случае рёбра меша будут ориентированы вдоль указанного направления. Доступны команды доработки меша, такие как заполнение пробелов, удаление длинных рёбер и острых вершин.

После доработки меш можно текстурировать изображениями, сгенерированными в полуавтоматическом режиме по облаку точек. Анализ де-

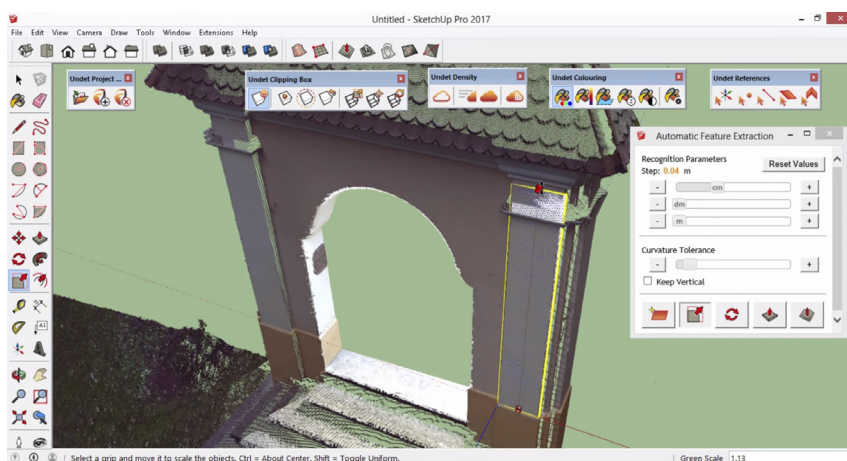


Рис. 20. Формирование геометрии пиллястра в плагине Undet V2 для SketchUp

формаций доступен в обеих программах и заключается в создании изображений, показывающих отклонение поверхности облака точек от плоскости в выбранной или вычисленной проекции. Полученные таким способом карты деформаций могут быть удобны для оценки качества возведённой стены строения или поверхности изготовленной детали.

Пробную 7-дневную версию плагина можно получить, написав на почту разработчику.

Группа 3: решения внутри больших САПР

В третью группу авторы решили выделить большие САПР. Во-первых, это универсальные программные комплексы от гигантов рынка Autodesk и Bentley, которые в погоне за актуальными инструментами скупают готовые решения и в итоге предлагают целую солянку продуктов. Во-вторых, это продукты, конкурирующие с гигантами в отдельных отраслях, в данном случае — дорожном проектировании. Объединяет рассматриваемые программы тот факт, что появление в них функций обработки лазерных данных — очередной эволюционный этап на долгом пути развития, а иной раз рассматривалось даже как «скорее рекламный ход» для продвижения продукта [12].

3.1. Autodesk AutoCAD Civil 3D 2018 (США)

- Распознавание линий, углов и линий сечения.
- Функция построения поверхности, основанная на статистическом алгоритме классификации.

Крупнейший в мире разработчик САПР Autodesk предлагает огромное количество программ для самых разных отраслей, но главной по-прежнему остаётся универсальная платформа AutoCAD, известная ещё с 1982 г. Возможность загрузить облако точек в систему впервые была продемонстрирована в версии AutoCAD 2011, однако более-менее значимые функции обработки появились ближе к версии AutoCAD 2015.

Современный «чистый» AutoCAD позволяет импортировать облака точек с созданием поискового индекса и отображать на экране до 25 миллионов точек одновременно. Основные ин-

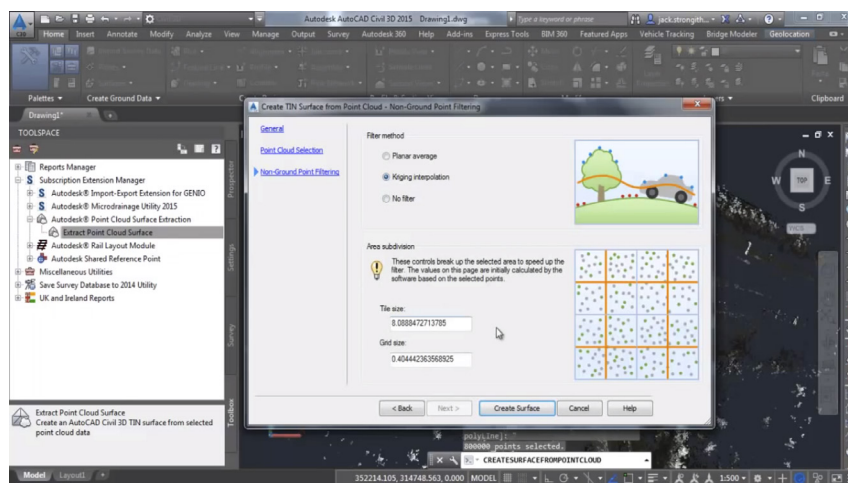


Рис. 21. Настройка классификации земли методом интерполяции на основе кригинга в AutoCAD Civil 3D

струменты сосредоточены на вкладке Point Cloud: в основном это настройки отображения, раскраски, функции обрезки и просмотра сечений.

Главный интерес представляет группа команд распознавания: здесь есть извлечение кромки как линии пересечения двух плоскостей (Extract edge), угла как точки пересечения трёх плоскостей (Extract corner), центральной линии (Extract central line) и всех линий в заданном сечении (Extract section lines). Другим важным инструментом является «умная» привязка курсора, позволяющая выполнять построения по точкам, расположенным на ближайшей к экрану поверхности, и отсеивать точки-выбросы, которые могли бы сбить с толку пользователя. На этом возможности «базовой» САПР заканчиваются.

Буквально на один инструмент больше можно найти в надстройке AutoCAD для гражданского строительства Civil 3D: команда создания поверхности по облаку точек запускает мастер создания триангуляции, в котором настраивается стиль и материал для отображения, процент импортируемых точек и самое главное — опциональная классификация земли с использованием простого среднего значения или же алгоритма кригинга (рис. 21). Соответственно, точка считается принадлежащей земле, если находится ниже значения Z-координаты, вычисленного с помощью интерполяции как простое среднее или наиболее вероятное значение.

Несколько отличается сценарий работы в архитектурной САПР Revit: ос-

новными инструментами выступают привязка облака к системе координат проекта, управление областью видимости облака точек, включая обрезку и построение горизонтальных срезов, и последующая оцифровка планов либо объектов интерьера. Также облака точек широко применяются в промышленной САПР от Autodesk — Plant 3D, но здесь, как правило, применяется сторонний плагин PointSense.

Для скачивания пробной 30-дневной версии Civil 3D потребуется регистрация.

3.2. Bentley Pointools и Descartes для Microstation (США)

- Функции «умной» привязки и проецирования на облако точек.
- Обнаружение и анализ отличий и коллизий модели и облака (Pointools).
- Удобная работа в разрезах (Descartes).

Компания, основанная в 1984 г. братьями Бентли, является вторым по значимости игроком на рынке САПР. В России продукты компании не так популярны, прежде всего вследствие высокой стоимости, но всё-таки известны: главным образом это САПР-платформа Microstation, а в контексте лазерного сканирования — программы Descartes и Pointools. Последние версии программ имеют дописку в названии «CONNECT Edition».

Продукт Pointools изначально создавался английской компанией Pointools Ltd. С 2009 г. разработкой заинтересовалась Bentley и через два года полно-

стью её поглотила [13]. Лежащее в основе программы ядро обработки под названием Pointools Vortex позже было подключено в другие программы Bentley, в частности Descartes.

По программе Pointools уже был обзор в журнале «САПР и Графика» [14], поэтому отметим здесь только её сильные стороны: это «умная» привязка курсора, позволяющая проводить линии на пересечении или границе условных плоскостей; «умное» проецирование (драпировка) линий на облако точек, например, для создания сечений рельефа; добавление размеров и примечаний; наконец, обнаружение коллизий модели и облака в режиме анимации или интерактивном режиме и поиск отличий между моделью и облаком — последние инструменты должны быть особенно востребованы в промышленности, но также могут применяться для анализа прохождения крупногабаритного транспорта (рис. 22). Программа поставляется в двух вариантах — как полноценная САПР и как средство просмотра облаков точек с функциями измерения и рецензирования (Pointools View).

Расширение Descartes для Microstation изначально предназначалось для обработки изображений, оцифровки архивных документов, в том числе устаревших форматов, а в версии SS4 были добавлены инструменты и для обработки данных лазерного сканирования. Одним из ключевых преимуществ здесь является концепция динамических видов, появившаяся в Microstation V8i, которая позволяет работать с разрезами облака точек точно так же, как и с основным видом, что удобно для изысканий на местности.

Помимо системы видов, в пользовательском интерфейсе Descartes SS4 можно найти закладки инструментального окна с командами ручной классификации, настройками отображения облаков точек, управления видимостью классов, построения сечений и навигацией по ним (рис. 23). Например, можно проводить линию с подсветкой точек поперечного профиля для текущего положения курсора.

Наиболее интересными выглядят функции из меню Point Cloud Advanced. Так, режим проведения линии (3D line following) при указании диапазона интенсивности сигнала способен быстро находить дорожную разметку, обозначая непрерывной линией даже прерывистую разметку, а проецирование точек и линий на облако точек (Drape element) при умелом использовании позволит построить карту высот или набор поперечных профилей линейного объекта, а созданные сечения можно объединить в твердотельную модель. По полученным с помощью экспорта или проецирования точкам всегда можно построить меш.

Для извлечения ЛЭП и других выраженных линейных объектов подойдёт команда привязки элемента (Snap element): сначала примерно задаём линию пути, затем указываем параметры

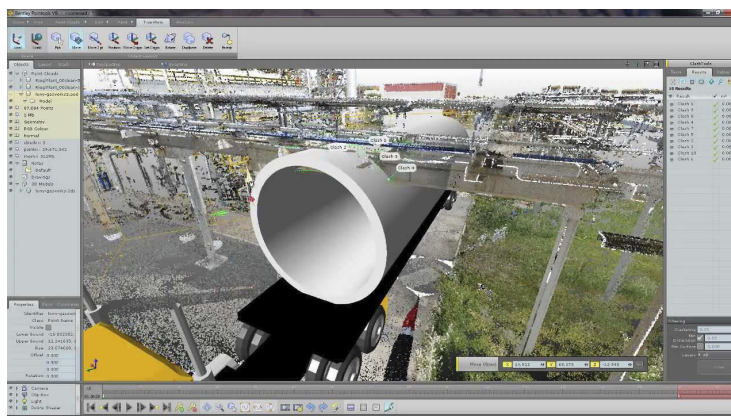


Рис. 22. Анализ прохождения фуры, перевозящей бетонную трубу, по территории предприятия в Bentley Pointools

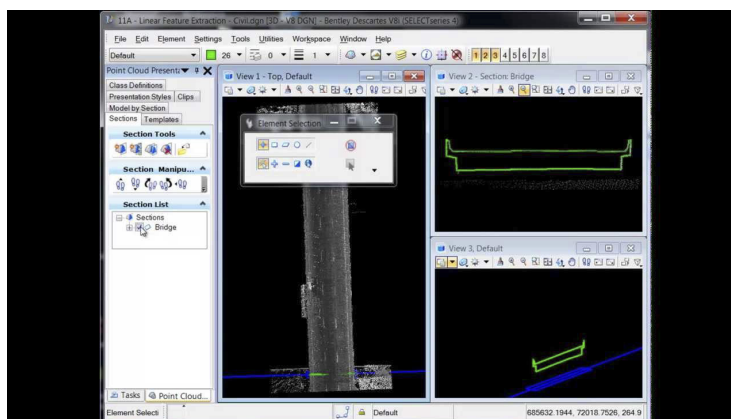


Рис. 23. Извлечение сечений моста по облаку точек в Bentley Descartes SS4

«умной» привязки, включая радиус поиска, шаг создания узлов линии, в качестве способа вычисления выбираем средние или медианные координаты, после чего программа создаёт более детализированную линию, повторяющую искомую форму. Данный режим также можно применить для проецирования точек и линий на верхний или нижний уровень двухъярусного объекта, например, путепровода.

Для скачивания любой из программ нужно оставить заявку на сайте разработчика.

3.3. MicroSurvey CAD 2017 (Канада)

- Полнофункциональная САПР с возможностью работы с данными лазерного сканирования.
- Инструменты автоматизированного распознавания линий дороги и дорожной разметки.
- Получение модели рельефа методом поиска точек с наименьшей высотной отметкой в узлах сетки в заданном радиусе.
- Множество обучающих материалов и видеороликов (на английском языке).

Компания MicroSurvey была организована в 1985 г. в Канаде, а в 2012 г. также вошла в состав мирового концерна Hexagon. Изначально

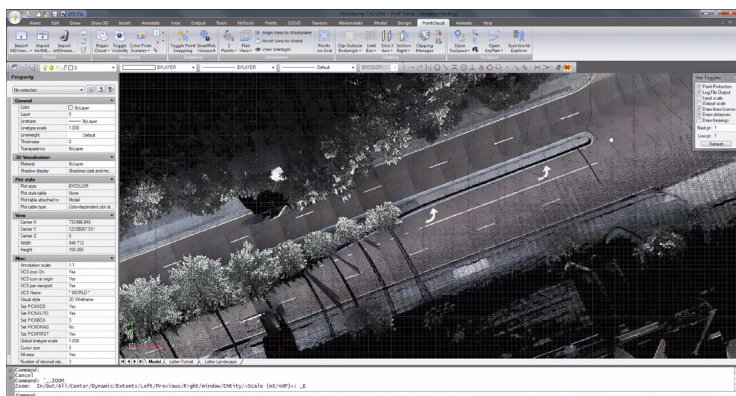


Рис. 24. Работа с облаком точек в MicroSurvey CAD 2016

для обработки данных лазерного сканирования в MicroSurvey разрабатывалась отдельная система — MicroSurvey Point Cloud. Последней версией этой системы стала PointCloud 2010, выпущенная в 2010 г., а затем весь функционал по работе с данными лазерного сканирования был перенесён в один из ключевых продуктов компании — САПР MicroSurvey CAD (рис. 24). Она объединяет в себе возможности традиционных САПР, а также различные функции для решения инженерно-геодезических, топографических и маркшейдерских задач.

Для загрузки облаков точек лазерного сканирования в MicroSurvey CAD дополнительно требуется установка серверного ПО Leica Cyclone SERVER от компании Leica Geosystems. Модуль Cyclone SERVER позволяет организовать обработку данных, используя технологию «клиент-сервер» и обеспечивает возможность совместной работы с хранящимися на сервере облаками точек лазерного сканирования, изображениями и моделям объектов. Такой подход делает возможной работу с большими и сложными проектами в многопользовательском режиме и позволяет не хранить «тяжёлые» облака точек на жёстком диске компьютера.

Данные со сканеров Leica при использовании программного комплекса Cyclone передаются на

Cyclone SERVER автоматически, а облака точек с других сканеров нужно предварительно загрузить на сервер, а затем импортировать в проект. Поддерживаются наиболее распространённые форматы данных лазерного сканирования: LAS, XYZ, PTS, e57 и т.д., а также форматы популярных лазерных сканеров, в том числе FARO, Riegl, Z+F (Zoller + Fröhlich) и др.

В MicroSurvey CAD реализована графическая подсистема для работы с облаками точек, позволяющая просматривать облака в различных проекциях и трёхмерном виде, строить сечения по заданным линиям, задавать зону видимости, отсекая ненужные точки.

Извлекать данные из облака точек в системе можно с помощью следующих инструментов.

- Инструмент Road Line Extractor позволяет автоматически распознавать линии дороги и дорожной разметки. Для извлечения линии достаточно указать две точки, лежащие на ней, и система сама экстраполирует линию по точкам лазерного сканирования. Примечательным является то, что распознаются не только прямые участки линии, но и кривые.
- Инструменты построения поверхности (TIN) делают возможным построение цифровой модели местности и нанесение горизонталей по данным облака точек с возможностью немедленного просмотра получившейся модели.
- С помощью инструмента Grid Survey можно получить цифровую модель рельефа местности. Принцип работы инструмента следующий: задаётся шаг сетки и радиус поиска точек, затем в каждом узле сетки в пределах заданного радиуса система ищет точку с наименьшей высотной отметкой. Эти точки считаются точками, лежащими на поверхности земли, по ним можно построить модель поверхности.

Кроме того, так как система является полнофункциональной САПР, для работы с точками лазерного сканирования можно использовать стандартные инструменты САПР: 3D-полилинии, привязку и пр.

Для получения демонстрационной версии MicroSurvey CAD необходимо оставить заявку на сайте компании. Следует учесть, что в версиях, предлагаемых для бесплатного ознакомления, инструменты для обработки данных лазерного сканирования (Road Line Extraction, Grid Survey и пр.) отсутствуют, однако возможна загрузка облаков точек и их просмотр в различных проекциях в трёхмерном виде.

Отдельно следует отметить наличие большого количества обучающих видеороликов, которые разъясняют некоторые неочевидные моменты и позволяют быстрее освоить принципы работы с системой. Ролики доступны как для просмотра

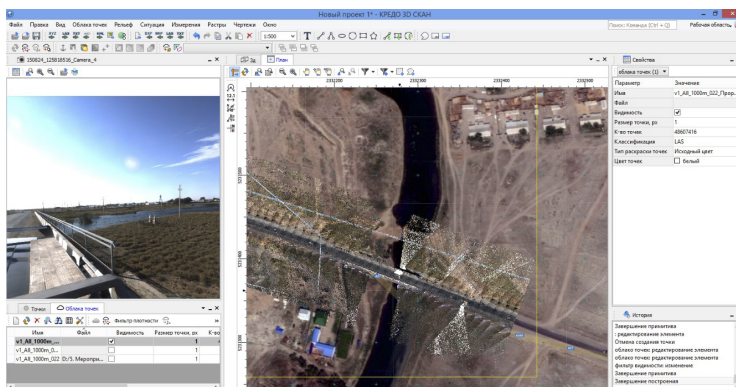


Рис. 25. Окно плана с облаком точек и панорамный вид в Credo 3D Скан 1.0

на сайте MicroSurvey, так и для скачивания вместе с дистрибутивом продукта.

3.4. «Кредо-Диалог» Credo 3D Скан 1.0 (Беларусь)

- Удобный просмотр облака точек, синхронизированный с видом фотопанорамы.
- Полный набор инструментов для создания ЦММ.
- Наличие «умных» функций, таких как обнаружение и классификация дорожных знаков.

Белорусская компания «Кредо-Диалог», основанная в 1989 г., известна как один из старейших отечественных разработчиков САПР для автомобильных дорог, решения которого актуальны по сей день и пользуются большой популярностью на постсоветском пространстве. В феврале 2016 г. компания представила свою систему для обработки данных лазерного сканирования местности под названием Credo 3D Скан.

Приложение использует идеологию и платформу Credo DAT — это классическая программа от «Кредо-Диалог», предназначенная для обработки традиционных инженерных изысканий и позволяющая строить полноценную ЦММ, включая рельеф, точечные и линейные объекты, растровые данные, интернет-карты и прочее. 3D Скан отличается прежде всего добавлением новой структуры данных — облака точек — и набором операций для взаимодействия с ней. Поддержка облаков точек реализована с использованием открытых библиотек OpenCV и Point Cloud Library, для работы программы необходима видеокарта с поддержкой OpenGL 3.3.

В основе пользовательского интерфейса 3D Скан лежит классическое главное меню, рабочее окно с 3D-видом либо планом проекта, окно свойств и классификатор с коллекцией условных знаков. При наличии данных панорамной видеосъёмки доступен также вид с фотопанорамой, автоматически связанный с положением и ориентацией камеры в 3D-виде (рис. 25).

Облака точек могут быть загружены из файлов в форматах LAS и TXT. Для регистрации используется геопространственная привязка, позволяющая объединить данные лазерного сканирования с интернет-картой [15]

и панорамными фотоизображениями. Чтобы привязать облако, необходимо при импорте выбрать правильную систему координат из библиотеки.

Первая задача при построении ЦМР — это создание модели рельефа. 3D Скан располагает набором наиболее востребованных инструментов, таких как классификация земли, создание матрицы высот, прореживание с заданной точностью по уклону и построение триангуляции по полученным точкам. Среди дополнительных возможностей отметим классификацию откосов с последующей раскраской по уклону, что упрощает процесс ручной оцифровки линий, образующих кювет. Заметим, что команды классификации в 3D Скан всегда создают новое облако точек.

Точечные и линейные объекты ситуации могут быть распознаны вручную или автоматически. При ручном создании используется привязка к облаку, отмеченному как рельеф: для каждой точки построения вычисляется средняя Z-отметка по точкам облака, взятым в окрестности курсора. Для каждого объекта указывается код классификатора, определяющий семантику топографического объекта. Такой способ необходим, когда искомым объектом не имеет выраженной геометрии в облаке, например для поиска кромки проезжей части.

Линейные объекты с выраженной геометрией, такие как ЛЭП, распознаются автоматически после указания стартового участка и параметров наращивания линии. Здесь предусмотрена удобная функция «Продолжить объект», позволяющая преодолеть разрыв в данных съёмке, вручную указав продолжение линии. Похожий алгоритм применяется для распознавания вертикальных столбов, например сигнального столбика, опоры освещения или дорожного знака: сначала создаётся осевая линия, а затем в точке пересечения её с рельефом создаётся точечный объект. Дорожная разметка распознаётся с использованием данных об интенсивности сигнала.

Помимо создания одиночных линий, можно распознавать профиль целиком. Для этого сначала в поперечном сечении объекта нужно обозначить линию профиля, а затем в 3D-виде указать стартовый участок для поиска профиля вдоль объекта. На

выходе программа создаёт основные продольные линии, образующие профиль, например линии бордюра или ограждения.

Программа предлагает и ряд других решений, выходящих за рамки модели облака точек, например создание растрового плана по слою, вырезанному из облака точек на определённой высоте, с последующей векторизацией контуров зданий и других вертикальных конструкций или обнаружение и классификация дорожных знаков по фотоизображениям.

Для запуска программы понадобится аппаратный ключ, пробной версии не предусмотрено.

3.5. «ИндорСофт» IndorCAD 2018 (Россия)

- Высокая достоверность результата распознавания благодаря «умной» привязке.
- Визуальный контроль распознавания линии в сечениях.
- Подготовка ЦММ по облаку точек и проектирование дороги в одной программе.

Томская компания «ИндорСофт» была зарегистрирована в 2003 г., хотя разработка программы для проектирования автомобильных дорог IndorCAD ведётся командой ещё с 1990-х гг. Первые функции для подключения и отображения облаков точек появились в IndorCAD 9 в 2013 г. [16, 17, 18], в 2014 г. были добавлены инструменты обработки [19].

Реализация облаков точек в IndorCAD отличается глубокой интеграцией, поэтому работа с ними осуществляется почти так же, как и с другими объектами: список облаков отображается в дереве проекта, функции импорта и экспорта расположены на вкладке «Данные», а команды построения точечных и линейных объектов находятся в подменю стандартных режимов построения.

Облака отображаются во всех видовых экранах, включая план, 3D-вид, поперечный профиль, при этом команды распознавания работают в плане и 3D-виде (рис. 26). Никаких ограничений на количество отображаемых точек не накладывается, за счёт порционной визуализации программа справляется с отображением действительно больших и протяжённых облаков точек, характерных для съёмки местности. Регистрация облаков ре-

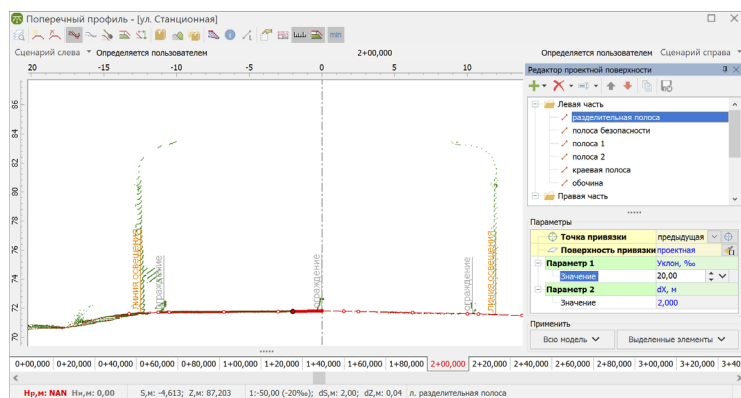


Рис. 26. Редактор поперечного профиля с данными лазерной съёмки в IndorCAD

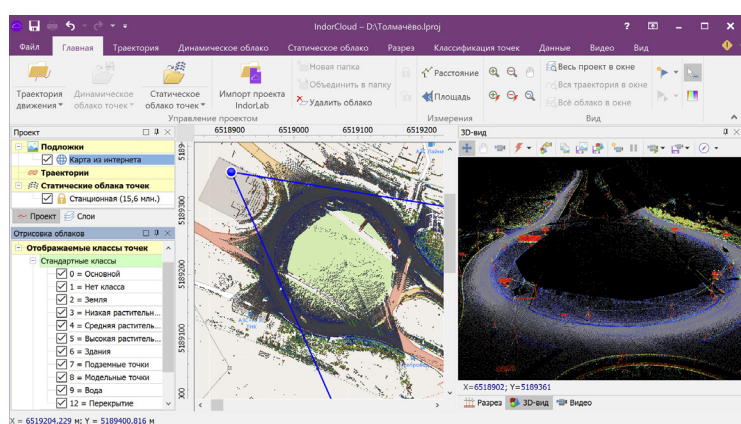


Рис. 27. Совмещение облака точек с интернет-картой и раскраска по уклону в IndorCloud

лизуется автоматически через геопространственную привязку, для этого должны быть выбраны верные системы координат проекта и облака точек.

В основе всех команд распознавания в программе лежит «умная» привязка: каждый раз при создании узла объекта статистический алгоритм определяет наиболее вероятную Z-отметку в облаке по точкам окрестности курсора. В случае ручного построения алгоритм может распознавать верхний и нижний уровни бордюра, предлагая соответствующие Z-отметки на выбор для одного и того же положения курсора.

Кроме ручных режимов, доступно полуавтоматическое извлечение линии перелома поверхности, например верхней линии откоса: для этого указывается коридор, в котором находится искомая линия, шаг наращивания и параметры определения перелома. В качестве опции можно проконтролировать выбор точки перелома на каждом сечении.

Поверхность рельефа в IndorCAD моделируется триангуляцией. Первый способ заключается в построении триангуляции по выборочным точкам облака и удобен для первичной оценки рельефа в заданной области. Во втором случае поверх-

ность строится по всем точкам предварительно прореженного облака.

Предполагается, что прежде чем будет выполняться извлечение рельефа и объектов ситуации, данные съёмки должны пройти определённую предварительную обработку в дополнительном модуле IndorCloud [10]. Ранний этап предобработки заключается в собственно формировании облаков точек из наборов данных, полученных от инерциальной навигационной системы и головок лазерного сканера, и может выполняться в программе, когда ПО от производителя оборудования недоступно или по каким-то причинам не устраивает.

Основной этап предобработки в IndorCloud включает в себя классификацию земли и прореживание. Также доступны команды классификации нижних, воздушных и изолированных точек-выбросов, точек на заданной высоте над землёй. Важной особенностью алгоритмов классификации в программе является сохранение результата классификации внутри исходного облака, что позволяет существенно сэкономить место на диске и использовать одно облако для разных целей, управляя видимостью отдельных классов. Среди многочисленных способов раскраски облака стоит выделить раскраску по уклону (рис. 27), позволяющую легче ориентироваться в съёмке и обнаруживать вертикальные объекты независимо от рельефа, в отличие от обычной градиентной раскраски.

Пробная 30-дневная версия программы IndorCAD доступна для скачивания на официальном сайте разработчика. Для получения пробной версии IndorCloud необходимо отправить запрос на почтовый адрес компании.

Сравнительная таблица

Для удобства читателей авторы постарались свести рассмотренные и некоторые другие программы в табл. 1, где помимо типовых наборов инструментов отмечены основные области применения, а также в отдельную позицию вынесена адаптация для дорожного строительства (столбец «Дорожные объекты»).

Отдельно отметим присутствие в таблице Agisoft Photoscan — пожалуй, наиболее известной программы для фотограмметрии, промежуточным этапом работы в которой, однако, является создание разреженных и плотных облаков точек с дальнейшей их обработкой.

Выводы

1. Рынок ПО для обработки данных лазерного сканирования свежий, и динамично развивающийся. Наблюдаются активные перепродажи фирм: постоянно появляются стартапы, самые успешные из которых скупаются гигантами, такими как Autodesk, Bentley, Trimble, 3D Systems, FARO. Как следствие, постоянно появляются новые продук-

Таблица 1.

Название	Разработчик	Платформа	Применение	Регистрация	Геопривязка	Сечения	«Умная» привязка курсора	Линии и примитивы	Бордюры	Дор. разметка	Опоры и столбы	Провода ЛЭП	Восстановление поверхности	Классификация земли	Классификация прочая	Сравнение с моделью	Пробная версия
Группа 1: ПО от производителей																	
Cyclone	Leica Technologies (Швейцария) / Hexagon (Швеция)		Архитектура, промышленность	+	+	+	+	+	+	+			TIN ¹ , меш	+			+
CloudWorx		AutoCAD, Microstation, Revit, NavisWorks, PDMS, 3DReshaper и другие	Архитектура, Промышленность		+	+	+	+	+		+/-		TIN	+	+		
Scene	FARO Technologies (США)			+	+	+	+	+					TIN, меш	+			+
PointSense		AutoCAD, Revit	Архитектура, промышленность, топоплан, культурное наследие			+	+	+					TIN				+
RiSCAN Pro	Rieg (Австрия)		Архитектура, топоплан	+		+	+	+	+				TIN				
RiPROCESS			Архитектура, топоплан	+	+	+							TIN				
RealWorks	Trimble (США)		Промышленность, архитектура, дороги	+	+	+	+	+	+		+/-					+	+
Geomagic Design X (RapidForm X²)	3D Systems (США)		Промышленность, архитектура, медицина	+		+		+					Mesh, тело, NURBS		+ ³	+	15 д.
Группа 2: Независимые решения																	
TerraScan	Terrasolid (Финляндия)	Microstation, PowerDraft	Топоплан, дороги	+ ⁴	+	+		+/-			+/-	+	+	+	+		+/-
3DReshaper	Technodigit (Франция)		Архитектура, промышленность, инфраструктура, медицина и другое	+	?	+		+	+/-	-	+	+	Mesh, CIMP	+	-	+	30 д.
VRMesh	Virtual Grid (США)		Промышленность, инфраструктура, архитектура, медицина и другое	+ ⁴		+/-		+	+	+	+	+	Mesh, grid ⁵ , NURBS	+	+		30 д.
VisionLidar	Geo-Plus (Канада)		Дороги, топоплан	+		+		+	+	+	+	+	TIN, меш, тело ⁶	+	+		беспрочная

Таблица 1. (Продолжение)

Название	Разработчик	Платформа	Применение	Регистрация	Геопривязка	Сечения	«Умная» привязка кursora	Линии и примитивы	Бордюры	Дор. разметка	Опоры и столбы	Провода ЛЭП	Восстановление поверхности	Классификация земли	Классификация прочая	Сравнение с моделью	Пробная версия
TopoDOT	Certainty 3D	Microstation	Топоплан, дороги, архитектура	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+		+
PointShape Advanced	DreamT&S Ltd. (Южная Корея)	Microstation, AutoCAD	Промышленность, дороги, архитектура	+		+		+	+/-	+	+	+	Меш, TIN, grid			+	+
Undet for AutoCAD	Undet (Литва)	AutoCAD	Архитектура, топоплан, промышленность	-		+		+	+/-	-	+/-		Меш	-		+	7 д.
Undet for SketchUp		SketchUp	Архитектура	-		+		+	+/-	-			+/-	-		+	7 д.
PhotoScan	Agisoft (Россия)		Топоплан, с/х, архитектура, промышленность										Меш, TIN, grid ⁷	+	+		+
Группа 3: Решения внутри больших САПР																	
AutoCAD Civil 3D	Autodesk	AutoCAD	Топоплан		+	+	+/-	+	-				TIN	+	-		30 д.
Pointools	Bentley Systems (США)		Топоплан, дороги, промышленность			+	+	+	+/-			+	Меш	P ⁸	P		+
Descartes		Автономно, Microstation	Топоплан, дороги, промышленность		+	+	+	+	+/-	+		+	Меш	P	P		+
Microsurvey CAD	Microsurvey (Канада)	IntelliCAD	Дороги	-		+		+	+/-	+			+	-			+/-
Credo 3D Скан	«Кредо-Диалог» (Беларусь)	Credo DAT	Дороги, топоплан, ПГС		+	+	+	+	+/-	+	+	+	TIN, grid	+	+	+/-	-
IndorCAD	«ИндорСофт» (Россия)		Дороги, топоплан, ПГС		+	+	+	+	+/-	-	P		TIN	+	+	+/-	30 д.
паноCAD Облака точек	«Нанософт» (Россия)		Универсальная		+?	+	-	-					TIN	+	+	+/-	30 д.

1 — триангуляция.

2 — 3D Systems приобрела южнокорейскую компанию RapidForm в 2012 г. и американскую Geopagis в 2013 г. [20, 21].

3 — выполняет сегментацию, выделяя поверхности по типам (плоская, выдавливания, вращения, свободная форма).

4 — в том числе уравнивание линейно-протяжённых сканов мобильной лазерной съёмки.

5 — поверхность (обычно триангуляция) по точкам, взятым в узлах регулярной сетки.

6 — под телом в данном случае подразумевается его внешняя поверхность (меш) либо тетраэдризация.

7 — реализованы два варианта: «карта высот» (ландшафт) и «произвольная поверхность».

8 — только в ручном режиме.

- ты, причём иногда это уже известные программы, сменившие название и платформу.
2. Компании-гиганты фактически проигрывают технологическую гонку в области обработки данных лазерного сканирования: наиболее интересные решения предлагают именно молодые компании, здесь же наблюдается быстрое развитие и появление новаторских подходов. Чтобы увидеть что-то новое, нужно смотреть VRMesh, VisionLidar и PointShape, а не Civil 3D и Descartes. По этой же причине можно ожидать новых поглощений.
 3. Молодые команды стремятся «поймать двух зайцев», выпуская программы двойного назначения, включающие модули и функции как для обратного инжиниринга, так и для изысканий на местности.
 4. При большом изобилии программ лучшим решением для проектировщика может быть установка сравнительно недорогого плагина к привычной ему системе или даже использование бесплатной, но продвинутой утилиты.
 5. Разумным требованием к изыскателю будет дополнительная предобработка данных, в частности фильтрация и базовая классификация (выделение рельефа), это сэкономит время и нервы проектировщику и положительно скажется на качестве проекта. ■

Литература:

1. Лазерное сканирование и 3D моделирование для восстановления информационной модели Ростовской АЭС / М. Аникишкин [и др.] // сайт проекта isicad.ru. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17243 (дата обращения: 15.12.2017).
2. Лазерное сканирование и последующая обработка данных в 3D для повышения качества управления промышленными объектами // сайт проекта isicad.ru. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18039 (дата обращения: 15.12.2017).
3. List of programs for point cloud processing // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_programs_for_point_cloud_processing (дата обращения: 15.12.2017).
4. Slyadnev S., Malyshev A., Turlapov V. CAD model inspection utility and prototyping framework based on OpenCascade // Conference Paper: GraphiCon 2017, At Russia, Perm. URL: https://www.researchgate.net/publication/319078392_CAD_model_inspection_utility_and_prototyping_framework_based_on_OpenCascade (дата обращения: 15.12.2017).
5. Готовцев А. Geomagic Studio знает, что делать с облаком точек // САПР и Графика. 2012. № 9. С. 53–55. URL: <http://sapr.ru/article/23261> (дата обращения: 15.12.2017).
6. Программное обеспечение, используемое для обработки данных сканирования // сайт НПП «Фотограмметрия». URL: <http://photogrammetria.ru/94-programmnoe-obespechenie-ispolzuemoe-dlya-obrabotki-dannyh-skanirovaniya.html> (дата обращения: 15.12.2017).
7. Leica Cyclone 3D Point Cloud Processing Software // Leica Geosystems. URL: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone> (дата обращения: 15.12.2017).
8. Leica CloudWorx Family of Products // Leica Geosystems. URL: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cloudworx> (дата обращения: 15.12.2017).
9. FARO expands presence in architecture, engineering and construction with acquisition of Kubit // FAFO. URL: <https://www.faro.com/news/faro-expands-presence-in-architecture-engineering-and-construction-with-acquisition-of-kubit/> (дата обращения: 15.12.2017).
10. Медведев В.И., Сарычев Д.С., Скворцов А.В. Предварительная обработка данных мобильного лазерного сканирования в системе IndorCloud // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 2(3). С. 67–74. DOI: 10.17273/CADGIS.2014.2.11
11. Князюк Е.М. Обзор возможностей систем эскизного проектирования автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 59–67. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.10
12. Ожигин Д. Миллионы точек в nanoCAD Plus 7, или чуть подробнее об облаках точек. // Блог компании Нанософт на ресурсе «Хабрахабр». URL: <https://habrahabr.ru/company/nanosoft/blog/267623/> (дата обращения: 15.12.2017).
13. Bentley acquires Pointools, vows to make point clouds 'a fundamental data type' // Graphic Speak. URL: <http://gfxspeak.com/2011/11/08/bentley-acquires-pointools-vows-to-make-point-clouds-a-fundamental-data-type/> (дата обращения: 15.12.2017).
14. Сметанюк А. Работа с данными лазерного сканирования в ПО Bentley // САПР и Графика. 2014. № 4. С. 78–80. URL: <http://sapr.ru/article/24471> (дата обращения: 15.12.2017).
15. Медведев В.И. Использование интернет-карт в САПР и ГИС в качестве подложек // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 119–125. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.18
16. Петренко Д.А. Новое поколение программных продуктов ИндорСофт // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2013. № 1(1). С. 10–17. DOI: 10.17273/CADGIS.2013.1.2
17. Метод проектирования ремонтов автомобильных дорог на основе мобильного лазерного сканирования / А.Н. Байгулов [и др.] // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2013. № 1(1). С. 29–32. DOI: 10.17273/CADGIS.2013.1.6
18. Сарычев Д.С. Мобильное лазерное сканирование // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2013. № 1(1). С. 36–41. DOI: 10.17273/CADGIS.2013.1.8
19. Сарычев Д.С. Обработка данных лазерного сканирования // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 1(2). С. 16–19. DOI: 10.17273/CADGIS.2014.1.4
20. 3D Systems Buys Rapidform // 3D Systems. URL: <https://www.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-buys-rapidform> (дата обращения: 15.12.2017).
21. 3D Systems to Acquire Geomagic // 3D Systems. URL: <https://www.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-acquire-geomagic> (дата обращения: 15.12.2017).