



ГЕОМАТИКА I

Система наземного лазерного
сканирования

СОДЕРЖАНИЕ

Данные заметки о наземном лазерном сканере дают базовую информацию для понимания основных компонентов и планирования метрической съемки с использованием преимущественно этой техники.

ГЕОМАТИКА I

Указатель

1. Введение.....	3
1.1 Что представляет собой лазерное сканирование?.....	4
1.2 Статическое и динамическое лазерное сканирование.....	4
1.3 Области применения лазерного сканирования.....	4
2. Принципы лазерного сканирования.....	5
2.1 Электромагнитный спектр и свет.....	5
2.2 Лазеры	7
2.3 Важные характеристики лазерного излучения.....	7
2.4 Безопасность при использовании лазера.....	8
2.5 Измерение с использованием света.....	9
2.6 Метрологические аспекты: анализ погрешностей.....	19
2.7 Современное лазерное сканирующее оборудование	26
3. Применение лазерного сканирования на практике.....	26
3.1 Планирование исследований.....	27
3.2 Работа в полевых условиях.....	31
3.3 Сбор данных.....	34
3.4 Подготовка данных.....	36
3.5 Регистрация и привязка к местности.....	36
3.6 Обработка 3D облака точек	40
3.7 Контроль качества и доставка.....	45

1. Введение

Оценка риска - это процесс, в ходе которого выявляются, анализируются или оцениваются угрозы, связанные с риском, для определения соответствующих способов устранения или контроля угроз на практике, оценка риска - это тщательный анализ рабочего места, здания или окружающей среды с целью выявления тех элементов, ситуаций, процессов и т.д., которые могут причинить вред, прежде всего людям.

После идентификации проводится оценка того, насколько вероятен и серьезен риск, что помогает принять решение о том, какие меры должны быть приняты для предотвращения или контроля вреда.

Процесс оценки риска можно представить следующим образом (рис. 1):

- Определение и оценка риска: установление и анализ потенциала, происхождения, характеристик и поведения опасности - например, частота возникновения/величина последствий
- Потенциальные методы снижения риска :
 - Сокращение: планирование и реализация структурных мероприятий (например, дамбы, плотины) или неструктурных мер, таких как законодательство о стихийных бедствиях.
 - Раннее предупреждение: предоставление своевременной и практической информации через определенные учреждения, которая позволяет людям, подвергающимся опасности, принять меры для избежания или снижения риска и подготовиться к эффективному реагированию.
 - Готовность к бедствиям и управление в чрезвычайных ситуациях: деятельность и меры, принимаемые заранее для обеспечения адекватного реагирования на воздействие опасности, включая меры, связанные со своевременными и эффективными предупреждениями, а также с эвакуацией и планированием на случай чрезвычайных ситуаций.
 - Восстановление/реконструкция: решения и меры, принимаемые на этапе после стихийного бедствия с целью восстановления условий жизни пострадавшего населения.

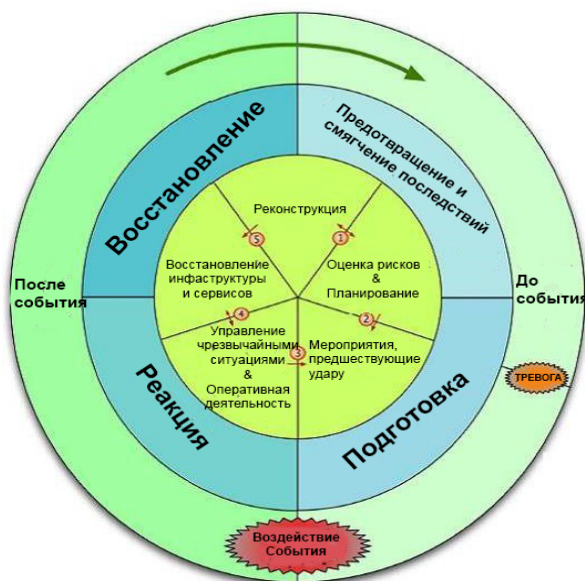


Рисунок 1 - Цикл управления рисками

Правильная оценка рисков или управление рисками требует актуальной информации, возможности быстрого реагирования, точных данных и возможности проверки данных на изменение в определенный промежуток времени. Именно с этим лучше всего справляются лазерные сканеры.

Лазерные сканеры используются для оценки рисков в самых разных областях:

- Анализ структурного состояния здания, находящегося под угрозой обрушения

- Оценка возможных деформаций сооружений с течением времени под воздействием внешних или внутренних сил
- Выявление зон возможного затопления путем анализа топографического рельефа местности
- Моделирование оползней или землетрясений
- Оценка состояния и анализ безопасности дорог и мостов
- Документирование зон бедствия, которые уже произошли; сюда входят обрушения зданий, дефекты дорожного полотна, разрушения конструкций, поврежденные транспортные средства; зоны столкновения, включая проезжие части, грузовые доки, автостоянки и лестницы; остатки пожаров в зданиях; проверка помех по новым проектам и базам данных сканирования состояния
- Регистрация мест преступлений (сравнение профилей повреждений, отсутствие нарушения улик, включение окружающей среды, быстрая очистка места преступления).
- Проведение съемок в местах с интенсивным движением без остановок и риска для съемочной группы
- Проведение дистанционных и точных измерений скальных пород (опасность обрушения породы)
- Моделирование цунами
- Составление карт ГИС: расположение пострадавших людей и критически важных объектов инфраструктуры, таких как больницы или пожарные депо.

1.1 Что представляет собой лазерное сканирование?

Лазерное сканирование описывает метод, при котором поверхность отбирается или сканируется с помощью лазерной технологии. Он анализирует реальный мир или среду объекта для сбора данных о его форме и, возможно, внешнем виде (например, цвете). Собранные данные могут быть использованы для создания цифровых двухмерных чертежей или трехмерных моделей, полезных для различных приложений.

Преимущество лазерного сканирования заключается в том, что оно позволяет регистрировать огромное количество точек с высокой точностью за относительно короткое время. В результате получается фотография с информацией о глубине. Лазерные сканеры являются приборами прямой видимости, поэтому для обеспечения полного охвата структуры требуется несколько позиций сканирования.

1.2 Статическое и динамическое лазерное сканирование

Современные технологии лазерного сканирования можно разделить на две категории: статические и динамические.

Когда сканер находится в фиксированном положении во время сбора данных, это называется статическим лазерным сканированием. Преимуществами этого метода являются высокая точность и относительно высокая плотность точечного изображения. Все статическое лазерное сканирование можно рассматривать как наземное лазерное сканирование; однако не все наземное лазерное сканирование можно отнести к статическому лазерному сканированию.

В случае динамического лазерного сканирования сканер устанавливается на мобильную платформу. Для таких систем требуются различные системы позиционирования, такие как INS и GPS, что делает систему более сложной и дорогой. Примерами динамического лазерного сканирования являются сканирование с самолета (воздушное лазерное сканирование), сканирование движущегося автомобиля или беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Данные заметки сосредоточены на статическом лазерном сканировании.

1.3 Области применения лазерного сканирования

На ранних этапах лазерное сканирование было ближнего радиуса действия и использовалось в основном в автомобильном и промышленном дизайне для облегчения процесса автоматизированного проектирования (CAD). Это помогло в массовом производстве потребительских товаров.

Однако, поскольку технология продолжает развиваться, используются и другие потенциальные области. Сканеры среднего класса были разработаны для нефтехимической промышленности. Из-за сложности заводов, которые были только

представлены в виде двухмерных чертежей, лазерное сканирование привело к полному трехмерному управлению объектами.

Благодаря очевидным преимуществам лазерного сканирования, таким как: бесконтактное измерение, высокая точность, большая дальность, быстрый сбор данных и т.д., другие дисциплины, такие как культурное наследие, архитектура, городское развитие, криминалистика и индустрия развлечений, начинают уверенно внедрять эту технологию (см. Рис. 2).



Рисунок 2 - Применение лазерных сканеров

2. Принципы лазерного сканирования

2.1 Электромагнитный спектр и свет

Электромагнитный спектр знаком вам гораздо больше, чем можно было бы подумать. Микроволновая печь, которую вы используете для разогрева пищи, и сотовые телефоны, которыми вы пользуетесь, используют части электромагнитного спектра. Мы видим предметы потому, что они излучают, отражают или передают часть видимой части спектра, которую мы называем светом. Эта видимая часть электромагнитного спектра состоит из цветов, которые мы видим в радуге - от красного и оранжевого до синего и фиолетового.

Каждый из этих цветов фактически соответствует разной длине волны света. Мы можем увидеть это, если пропустим белый свет через стеклянную призму - фиолетовый свет изгибается ("преломляется") больше, чем красный, потому что он имеет меньшую длину волны - и мы увидим радугу цветов.

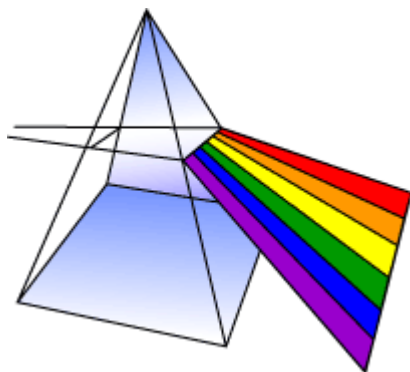


Рисунок 3 - Призма, преобразующая белый свет в различные цвета

Волны в электромагнитном спектре различаются по размеру от очень длинных радиоволн (размером со здания) до очень коротких гамма-лучей, размер которых меньше размера ядра атома.

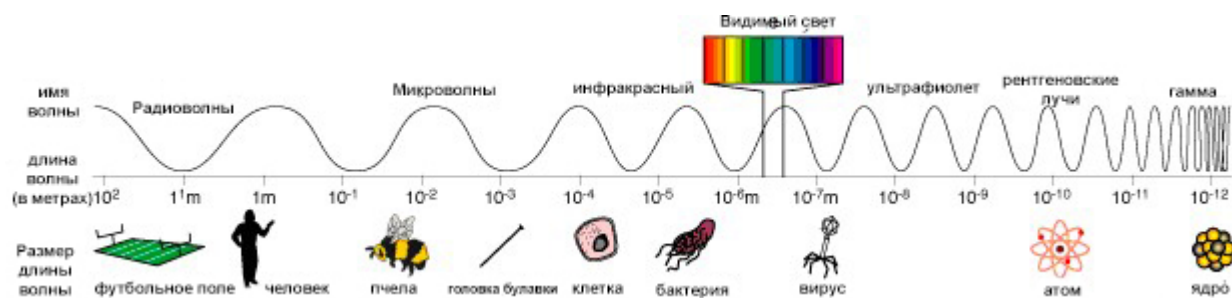


Рисунок 4 - Электромагнитный спектр

Электромагнитный спектр может быть выражен в виде его энергии, длины волны или частоты. Эти величины связаны между собой следующими уравнениями:

$$\text{скорость волны}(c) = \text{частота}(f) \cdot \text{длина волны}(\lambda)$$

и

$$\text{энергия}(E) = h \cdot \text{частота}(f) = \frac{h \cdot \text{скорость волны}(c)}{\text{длина волны}(\lambda)}$$

где:

c это скорость света (299,792,458 m/s)

h это постоянная Планка (6.626069.10⁻³⁴ J·s).

Таким образом, высокочастотные электромагнитные волны имеют короткую длину волны и высокую энергию; и наоборот, низкочастотные волны имеют большую длину волны и низкую энергию.

2.2 Лазеры

Устройство, способное генерировать световую волну, используя только очень узкую полосу спектра, носит название лазер. Типичный лазер излучает свет в виде узкого луча с малой расходимостью и четко определенной длиной волны (соответствующей определенному цвету, если лазер работает в видимом спектре). Это контрастирует с таким источником света, как лампа накаливания, которая излучает в большом телесном угле и в широком спектре длин волн. Эти свойства можно обобщить термином "когерентность".

Лазеры фактически похожи на транзисторы, они генерируют или усиливают свет, так же как транзисторы генерируют и усиливают электронные сигналы на звуковых, радио или микроволновых частотах. Слово "лазер" - это аббревиатура от Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Первый работающий лазер был продемонстрирован в мае 1960 года Теодором Мейманом в Исследовательской лаборатории Хьюза.

Лазеры используются в повседневной жизни, особенно в оптических устройствах хранения данных, таких как компакт-диски и DVD-плееры, в которых лазер сканирует поверхность диска для извлечения данных. Другие распространенные области применения лазеров - считыватели штрих-кодов и лазерные указки. В промышленности лазеры используются для резки стали и других металлов и для нанесения рисунков, таких как буквы на компьютерных клавиатурах. Лазеры также используются в военных и медицинских целях.

2.3 Важные характеристики лазерного излучения

Лазерный свет - это просто свет, генерируемый лазерным устройством. Такой свет обладает некоторыми особыми свойствами, которые отличают его от света другого происхождения:

- Лазерное свет образуется в виде лазерного луча. Такой лазерный луч имеет высокую (иногда чрезвычайно высокую) степень пространственной когерентности, поэтому он распространяется преимущественно в четко определенном направлении с умеренной расходимостью луча. Термин когерентность означает, что электрический сигнал в разных местах профиля луча колеблется с жесткой фазовой зависимостью. Именно благодаря этой когерентности лазерный луч может распространяться на большие расстояния и может быть сфокусирован на очень маленьких участках.
- Лазерное излучение также имеет высокую степень временной когерентности (в большинстве случаев), что эквивалентно большой длине когерентности. Большая длина когерентности подразумевает жесткую фазовую зависимость на относительно больших временных интервалах, что соответствует большим расстояниям распространения (часто многие километры).
- Сочетание большой временной когерентности с большим временем когерентности или длиной когерентности приводит к узкой спектральной полосе (или ширине линии). Это означает, что видимые лазерные лучи имеют определенный чистый цвет, например, красный, зеленый или синий, но не белый или пурпурный. Например, большинство лазеров, используемых в измерительных устройствах ближнего и среднего радиуса действия, имеют длину волны 1064 нм (ближний инфракрасный) или 532 нм (зеленый лазер). Следует отметить, что большая длина когерентности создает тенденцию к явлению лазерного спекла, т.е. характерного зернистого рисунка, который поддается наблюдению. Этот эффект можно заметить, например, когда лазерный луч попадает на металлическую поверхность.
- В большинстве случаев лазерное излучение линейно поляризовано. Это означает, что электрическое поле осциллирует в определенном пространственном направлении.

В зависимости от области применения лазерное излучение может обладать и другими замечательными свойствами:

- Лазерный свет может быть видимым, но большинство лазеров на самом деле излучают в других спектральных областях, в частности в ближней инфракрасной области, которую человеческие глаза не могут воспринимать.
- Лазерное излучение не всегда является непрерывным, оно может подаваться в виде коротких или ультракоротких импульсов. Как следствие, пиковая мощность может быть чрезвычайно высокой.

Благодаря свойствам когерентности лазерные лучи остаются в фокусе при проецировании на удаленную местность. Другим фундаментальным свойством (лазерных) световых волн является скорость их распространения. Световые волны распространяются с конечной и постоянной скоростью в определенной среде. Благодаря этим свойствам лазерный свет отлично подходит для измерения объектов. О том, как это делается, будет рассказано в следующих параграфах.

2.4 Безопасность при использовании лазера

С 1958 года, когда был изобретен лазер, его применение получило широкое распространение в научных, военных, медицинских и коммерческих областях. Когерентность, высокая монохроматичность и способность достигать экстремальных мощностей - все это свойства, которые позволяют применять лазеры в этих специализированных областях. Поэтому с лазерным излучением следует обращаться крайне осторожно, и понимание видов лазеров становится обязательным.

Для того чтобы пользователи могли определить потенциальный риск, все лазеры и устройства, использующие лазеры, маркируются классификацией, в зависимости от длины волны и мощности энергии, которую производит лазер. Европейский стандарт [3] предоставляет информацию о классах лазеров и мерах предосторожности. Он описывает семь классов лазеров:

- Лазеры класса 1 безопасны при разумно прогнозируемых условиях эксплуатации, включая использование оптических инструментов для внутрилучевого наблюдения.
- Лазеры класса 1M безопасны при разумно прогнозируемых условиях эксплуатации, но могут быть опасны, если в луче используется оптика.
- Лазеры класса 2 обычно вызывают рефлекс моргания, который защищает глаза; ожидается, что эта реакция обеспечит адекватную защиту в разумно прогнозируемых условиях, включая использование оптических инструментов для внутрилучевого наблюдения.
- Лазеры класса 2M обычно вызывают рефлекс моргания, который защищает глаза; ожидается, что эта реакция обеспечит адекватную защиту в разумно прогнозируемых условиях. Однако просмотр выходного сигнала может быть более опасным, если пользователь использует оптику внутри луча.
- Лазеры класса 3R потенциально опасны при прямом просмотре внутри луча, хотя риск ниже, чем для лазеров класса 3B.
- Лазеры класса 3B обычно опасны, когда происходит прямое внутрилучевое воздействие, хотя просмотр диффузных отражений обычно безопасен. Как правило, лазеры этого класса не подходят для исследовательских приложений.
- Лазеры класса 4 вызывают повреждение глаз или кожи при прямом воздействии. Лазеры этого класса также способны создавать опасные отражения. Данный класс лазеров не подходит для исследований.

Пользователям систем лазерного сканирования необходимо всегда знать класс своего прибора. В частности, пользователь должен убедиться, что используется правильная система классификации. (Более подробную информацию о лазерной безопасности см. в стандарте Международной электротехнической комиссии [3]).

Особые меры предосторожности и процедуры изложены в стандарте МЭК для лазерных приборов класса 1M, класса 2M и класса 3R, используемых в геодезии, выравнивании и нивелировании. К этим мерам предосторожности, имеющим отношение к лазерному сканированию, относятся:

- Установка, настройка и эксплуатация лазерного оборудования должны поручаться только квалифицированным и обученным лицам.
- В местах, где используются эти лазеры, должен быть размещен соответствующий предупреждающий знак о лазерном излучении.

- Следует принимать меры предосторожности, не допуская, чтобы люди смотрели прямо в луч (длительное рассматривание луча может быть опасным). Прямой просмотр луча через оптические приборы (теодолиты и т.д.) также может быть опасен.
- Необходимо принять меры предосторожности, чтобы лазерный луч не был непреднамеренно направлен на зеркальные (спекулярные) поверхности.
- Когда лазер не используется, он должен храниться в месте, куда несанкционированный персонал не может получить доступ.
- В условиях потенциально взрывоопасной среды (например, на нефтехимических заводах, в горнодобывающей промышленности) следует использовать специальное "взрывобезопасное" лазерное оборудование. Важными свойствами взрывозащищенного оборудования являются: ограничение пиковой мощности лазера, отсутствие искрообразования и ограничение максимальной температуры оборудования.

2.5 Измерение с использованием света

Благодаря последним достижениям в области развития компьютерного зрения и сенсорных технологий, свет используется для измерения объектов различными способами. Эти методы измерения можно разделить на две категории: активные и пассивные методы.

Пассивные сканеры сами не испускают никакого излучения, а полагаются на обнаружение отраженного излучения окружающей среды. Большинство сканеров такого типа обнаруживают видимый свет, поскольку он является легкодоступным излучением окружающей среды. Могут использоваться и другие виды излучения, например, инфракрасное. Пассивные методы могут быть очень дешевыми, так как в большинстве случаев они не требуют специального оборудования, кроме цифровой камеры. Проблема этих методов заключается в том, что они полагаются на поиск соответствий между двухмерными изображениями, которые не всегда имеют уникальные решения. Например, повторяющиеся узоры могут "обмануть" метод измерения. Точность этих методов зависит в основном от разрешения системы визуализации и плотности идентифицируемых особенностей на изображении.

В настоящих записях мы сосредоточимся на активных методах измерения. Активные сканеры испускают некоторое управляемое излучение и регистрируют его отражение, чтобы исследовать объект или среду. Возможные типы используемого излучения включают свет, ультразвук или рентген. Поскольку эти активные методы измерения требуют наличия лазерного излучателя и приемника, они механически более сложны, чем пассивные методы. Основными преимуществами этих систем является то, что:

- Им не требуется окружающее освещение, поскольку они генерируют собственное излучение;
- Они обеспечивают высокую плотность измерений весьма автоматизированным способом;
- Они могут использоваться на поверхностях без каких-либо особенностей;
- Они имеют относительно быстрое время получения данных (1000 - 500.000 точек/сек).

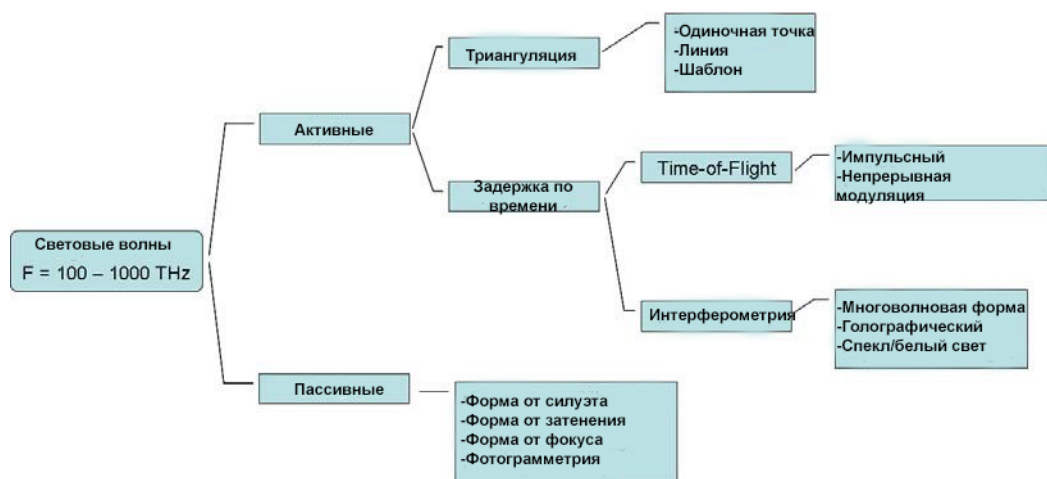


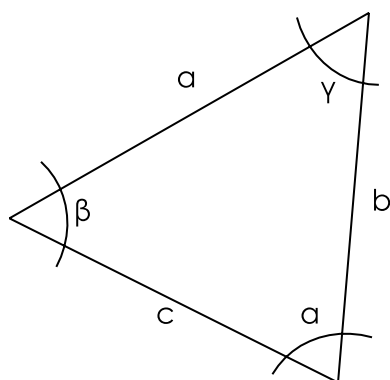
Рисунок 5 - Категоризация методов измерения с использованием света

Однако на некоторые активные системы влияют внешние источники света, отражательная способность, цвет и шероховатость. Эти недостатки будут рассмотрены в дальнейшем.

Существует ряд активных сканеров, различающихся способом получения и/или анализа сигнала отраженного излучения. В следующих главах эти различные типы активных сканеров будут описаны более подробно.

2.5.1 Измерения на основе триангуляции

В основе многих методов измерения лежат треугольники. Они использовались для основных геодезических измерений уже в Древней Греции и до сих пор встречаются в современных лазерных 3D-камерах. Математическая основа треугольника (тригонометрия), которая лежит в основе этих методов измерения, основанных на триангуляции, принадлежит греческому философу Фалесу (6 век до н.э.).



$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos \alpha$$

$$c = a \cdot \cos \beta + b \cdot \cos \alpha$$

Рисунок 6 - Принцип триангуляции

Триангуляционный лазерный сканер использует тот же принцип для зондирования окружающей среды. Он направляет лазерный луч на объект и использует камеру для поиска местоположения проекции лазера на объекте. Лазерный излучатель и камера установлены под постоянным углом, создавая треугольник между ними и лазерной проекцией на объекте, отсюда и название триангуляция. Благодаря такой конфигурации проекция лазера изменяется в поле зрения камеры в зависимости от расстояния до камеры.

Анализ Рисунка 7 показывает, что на стороне треугольника (D) расстояние между камерой и

лазерный излучатель, известен. Угол лазерного излучателя (α) также известен. Угол камеры (β) можно определить, посмотрев на расположение лазерного луча в поле зрения камеры. Эти три элемента информации позволяют полностью определить форму и размер треугольника и точно определить глубину расположения измеряемого объекта.

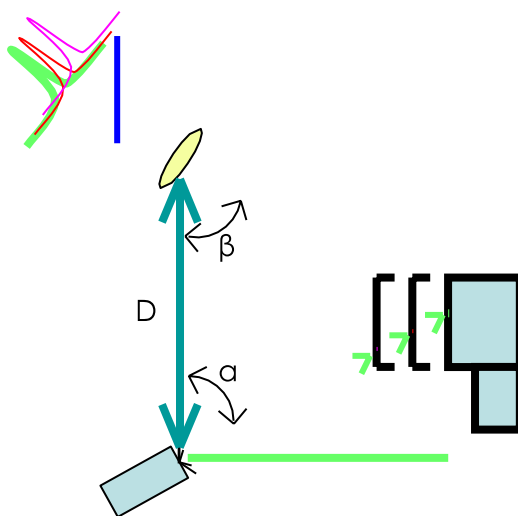


Рисунок 7 - Принцип триангуляционного лазерного сканирования

Таким образом, видно, что чем шире базовая линия (D), тем меньше влияние ошибок в координатах пикселей на оценку местоположения глубины. Тем не менее, базовая линия не должна быть слишком большой, так как в этом случае лазерный проектор и камера будут иметь уменьшенное перекрывающееся поле зрения (FOV), и лазерное пятно может оказаться вовсе не запечатленным на изображении камеры.

В качестве краткого вывода, возможными способами уменьшения неопределенности в направлении глубины являются:

- Уменьшение расстояния объекта до сканера → увеличивает эффект тени
- Увеличение базы триангуляции (D) → также увеличивает эффект тени
- Увеличение фокусного расстояния объектива → уменьшение поля зрения
- Уменьшение погрешности измерений → больше пикселей в камере

В большинстве случаев используется лазерная линия, а не одна лазерная точка, которая проносится по объекту, позволяя запечатлеть весь объект в 3D. Это означает, что угол лазерного излучателя также изменяется при прохождении лазера по объекту.

Из-за физических ограничений, связанных с использованием более широкой базовой линии и ограниченным полем зрения камеры, триангуляционные сканеры используются в приложениях, как правило, требующих рабочего диапазона менее 10 метров. По сравнению со сканерами средней и большой дальности, основанными на принципах временной задержки (см. главу 2.5.2), триангуляционные сканеры имеют очень высокую точность порядка микронов.

На практике метод активной триангуляции был изобретен для решения общеизвестной проблемы соответствия, характерной для пассивных методов измерения. Проблема соответствия может быть сформулирована следующим образом: даны два изображения I_1 и I_2 сцены, снятые с двух разных точек обзора, относительная ориентация камер и пара точек соответствия между этими изображениями; затем мы можем вычислить соответствующую 3D точку, используя принцип триангуляции. Таким образом, проблема соответствия заключается в поиске точек совпадения между различными изображениями.

Метод активной триангуляции использует лазерное излучение для решения этой проблемы, отмечая 3D-точку на объекте цветом лазерного излучения, чтобы ее можно было легко обнаружить на изображении.

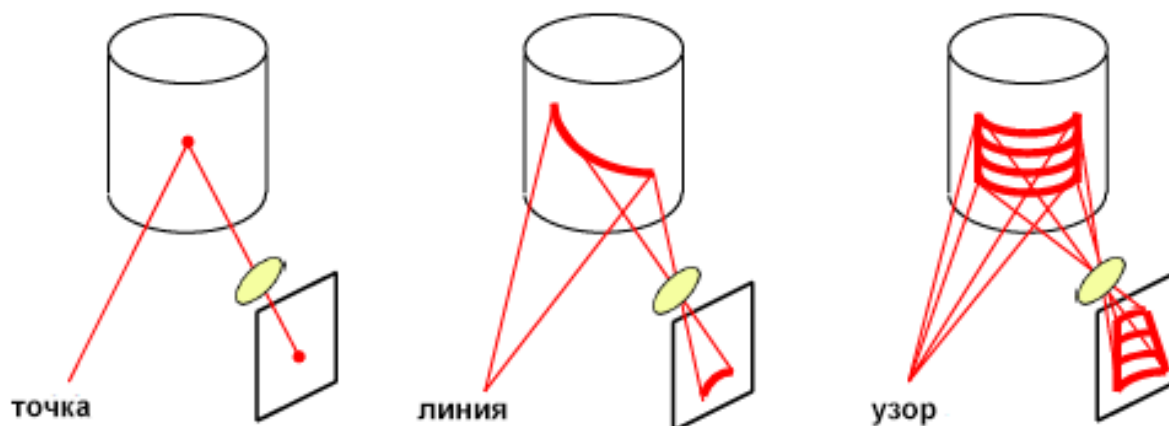


Рисунок 8 - Различные методы проецирования, используемые в триангуляционных сканерах

Во избежание использования механических приспособлений были введены некоторые инновационные модификации. Вместо перемещения/вращения лазерного излучателя для охвата всего объекта можно проецировать узоры из точек или линий, которые охватывают весь объект целиком. Используются различные шаблоны, от обычных линий до пространственных закодированных шаблонов, которые модулируют свою частоту или фазу во времени для обеспечения лучшей точности. Обратите внимание, что эти пространственно-кодированные узоры требуют, чтобы сканирование проводилось на статичном объекте.

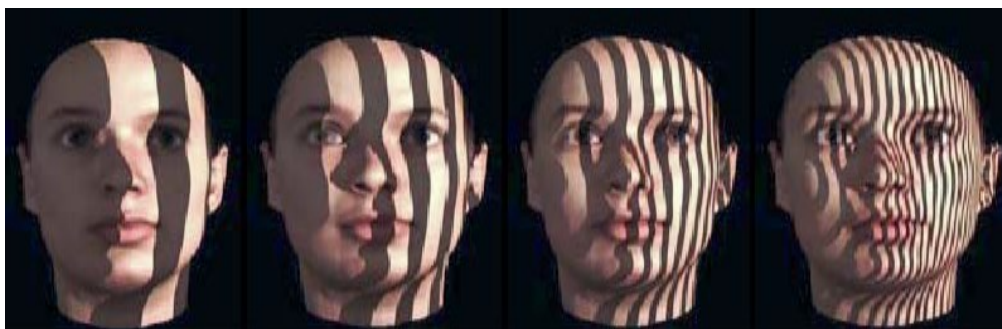


Рисунок 9 - Проекция стандартного узора

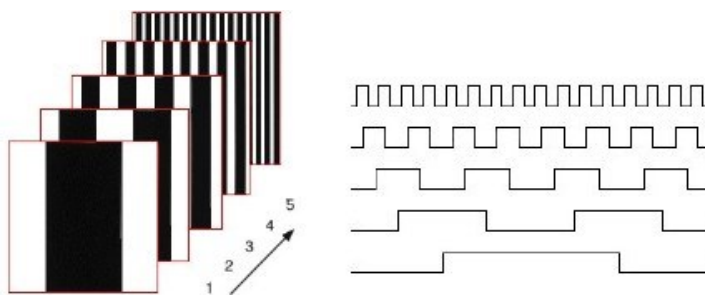


Рисунок 10 - Бинарный кодированный узор с фазовой модуляцией во времени, также называемый метод проекционных полос

В настоящее время для повышения точности и надежности этих систем используются еще более сложные узоры, основанные на эффекте Муара. Эффект Муара - это следствие взаимодействия двух амплитудно-модулированных пространственных сигналов. Это явление можно наблюдать на телевидении, когда люди, у которых берут интервью, одеты в полосатую одежду. Сканер Муара проецирует обычный рисунок на сканируемый объект, в то время как камера, снимающая сцену, также имеет встроенный обычный рисунок. Интерференция этих двух узоров, наложенных друг на друга, создает муаровый узор, по которому мы можем определить точные изменения глубины.

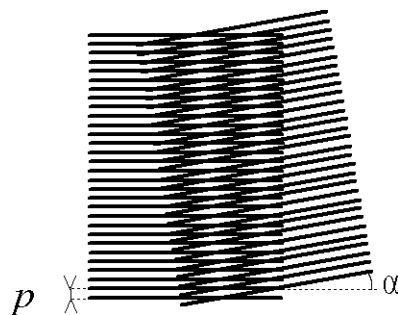


Рисунок 11 - Муаровый узор, образованный двумя наборами параллельных линий, один из которых наклонен под углом 5° к другому.

В качестве заключительного комментария к сканерам на основе триангуляции: основной проблемой при использовании систем проекции кодированных линий является уникальное разделение различных направлений проекции на объектах, имеющих резкие скачки глубины и большие различия текстуры по всей поверхности.

2.5.2 Измерение, основанное на времени

Сканеры, ориентированные на время, - это активные сканеры, которые измеряют временной интервал между двумя моментами. В широком смысле существует два принципа сканирования на основе времени: Импульсный (Time-of-Flight) и Фазовый сканеры.

Импульсные (time-of-flight) сканеры (некогерентное обнаружение)

Как уже упоминалось в параграфе 2.3, световые волны распространяются с конечной и постоянной скоростью в определенной среде. Поэтому, когда можно измерить временную задержку, создаваемую светом, проходящим от источника к отражающей поверхности цели и обратно к источнику (путь туда и обратно), расстояние до этой поверхности можно оценить по следующей формуле:

$$D = \frac{c \cdot t}{2}$$

Где c = скорость света в воздухе

t = время между отправкой и получением сигнала

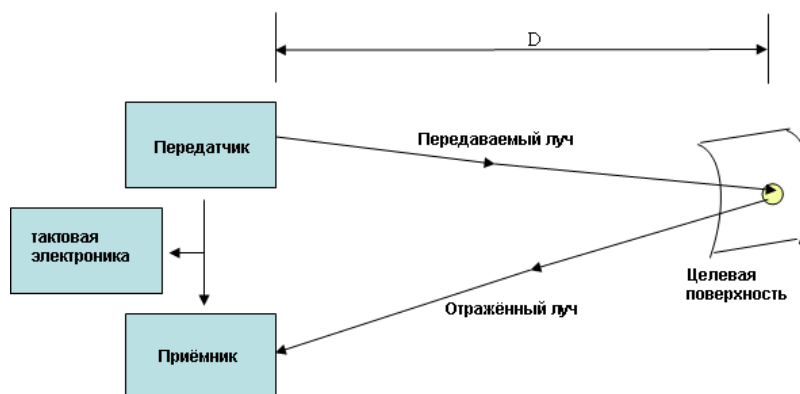


Рисунок 12 - Принцип работы time-of-flight лазерного сканера

Принятое в настоящее время значение скорости света в вакууме точно равно $c = 299\,792\,458$ м/с. В случае если световые волны распространяются в воздухе, то к c необходимо применить поправочный коэффициент, равный показателю преломления (в зависимости от плотности воздуха). Принимая во внимание эту скорость света, можно подсчитать, что для прохождения 1 метра требуется 3,33 наносекунды. Следовательно, чтобы достичь точности определения точки в 1 мм, необходимо иметь возможность измерить временную задержку около 3,33 пикосекунды.

Импульсные time-of-flight сканеры не используют непрерывные лазерные лучи, а применяют лазерные импульсы. Они сканируют все поле зрения по одной точке за раз, изменяя направление дальномера. Направление обзора лазерного дальномера изменяется с помощью отклоняющего устройства (см. параграф 2.5.3). Типичные импульсные time-of-flight 3D лазерные сканеры могут измерять до 2,000~50,000 точек каждую секунду.

Обратите внимание, что для однозначного измерения измеряемое время (t) должно быть больше, чем ширина импульса, $T_{\text{импульс}}$. Таким образом,

$$t > T_{\text{импульс}}$$

или

$$d > \frac{1}{2} c \cdot T_{\text{импульс}}$$

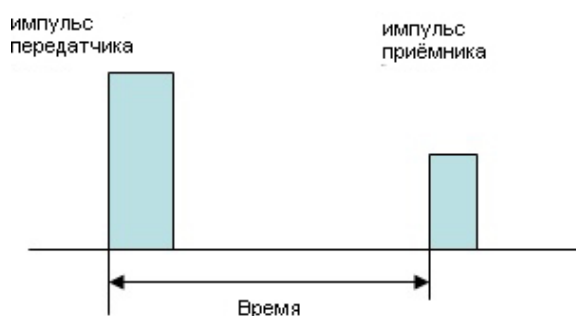


Рисунок 13 - Измерение лазерного импульса

Чтобы лучше понять эти уравнения, можно использовать цифры. Если установить $T_{\text{импульс}}$ равным 10ps, это означает, что максимальная точность, которой можно достичь, составит $d = 1,5$ мм. Большинство коммерческих систем

средней и большой дальности обеспечивают точность около 6-10 мм. Поскольку точность зависит от механизма синхронизации, ошибка time-of-flight сканера практически не зависит от самого расстояния (за исключением лазерного следа, см. главу 2.6.1).

Важно отметить, что метод временной деривации для измерения обратного импульса зависит от желаемого временного разрешения, скорости счета и требуемого динамического диапазона импульса. При разработке дискриминаторов обычно используются такие принципы, как временная привязка к ведущему краю (постоянная амплитуда), временная привязка к пересечению нуля (деривация), временная привязка к первому моменту (интегрирование) и временная привязка к постоянной доле (поиск момента в импульсе, когда его высота имеет постоянное отношение к амплитуде импульса).

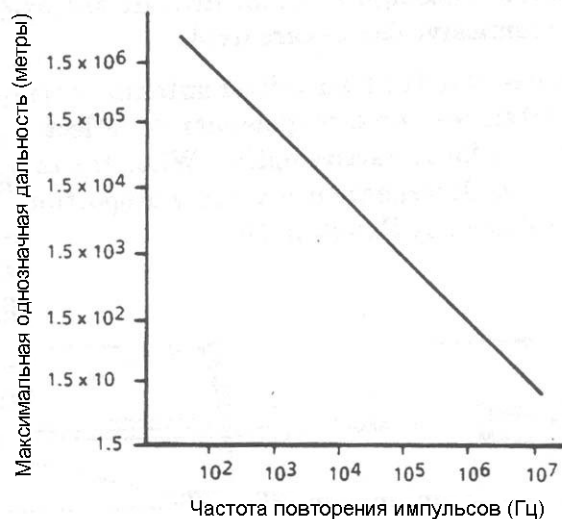


Рисунок 14 - Максимальная однозначная дальность в сравнении с частотой повторения импульсов

В импульсной time-of-flight системе максимальная частота повторения импульсов диктуется тем, что передатчик не может послать очередной импульс, пока не будет получено эхо от предыдущего [7]. Цель этого ограничения - избежать путаницы в импульсах, поступающих на счетчик временных интервалов, поэтому данное ограничение называется максимальной однозначной дальностью. Максимальная однозначная дальность зависит от длительности импульса и его частоты.

Три основных фактора определяют точность импульсной системы определения дальности [7]:

- Возможность выбора одного и того же относительного положения на передаваемом и принимаемом импульсе для измерения временного интервала. Это ограничено шумом, временным дрожанием, уровнем сигнала и чувствительностью порогового детектора, а также краткостью и воспроизводимостью импульса передатчика.
- Точность, с которой известны фиксированные временные задержки в системе.
- Точность аппаратуры для измерения временного интервала.

Преимуществом использования импульсов для лазерной дальности является высокая концентрация передаваемой лазерной мощности. Эта мощность позволяет достичь требуемого SNR (соотношение сигнал/шум), необходимого для высокоточных измерений на больших расстояниях (до нескольких сотен метров). Недостатком является проблема определения точного времени приема обратно рассеянного лазерного импульса из-за изменчивой природы оптического порога и атмосферного затухания.

Фазовая основа

Другой принцип измерения времени позволяет избежать использования высокоточных часовых механизмов за счет модуляции мощности лазерного луча. Излучаемый (некогерентный) свет модулируется по амплитуде и попадает на поверхность. Рассеянное отражение собирается, и схема измеряет разность фаз между отправленной и принятой формами волны, следовательно, временную задержку.

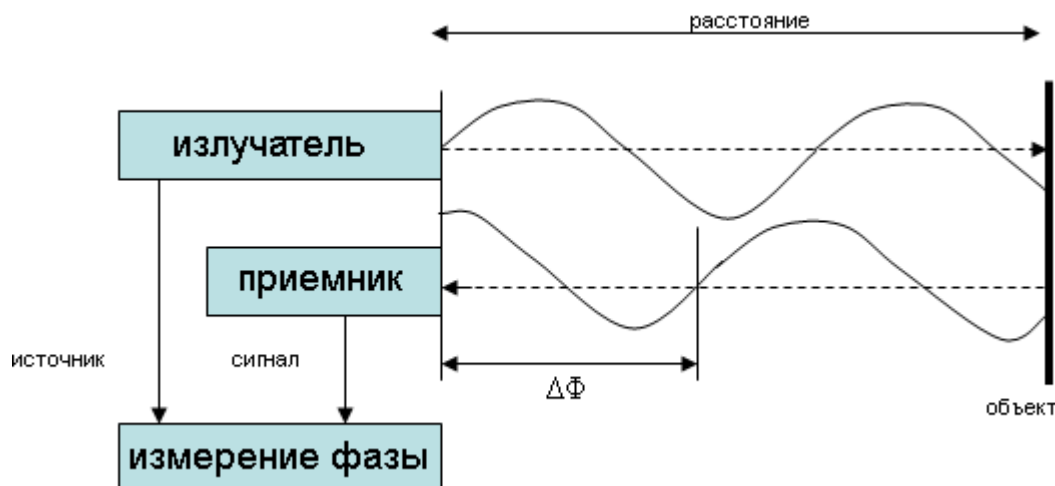


Рисунок 15 - Принцип измерения на основе фазы

Типичные фазовые сканеры модулируют свой сигнал с помощью синусоидальной модуляции, амплитудной (AM) или частотной (FM) модуляции, псевдо-шума или поляризационной модуляции. В случае синусоидального модулированного сигнала отраженный свет подвергается демодуляции с помощью четырех точек выборки, которые запускаются излучаемой волной. Из четырех измерений $c(\tau_0)$, $c(\tau_1)$, $c(\tau_2)$, и $c(\tau_3)$ можно рассчитать фазовый сдвиг $\Delta\Phi$, смещение B и амплитуду A :

$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4}$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2}$$

$$\Delta\Phi = \arctan(c(\tau_0) - c(\tau_2))$$

Данная разница в фазах может быть связана с временной задержкой, аналогичной той, которая измеряется в импульсных сканерах. Связь между различием фаз ($\Delta\Phi$), частотой модуляции ($f_{\text{модуляции}}$) и временной задержкой (t) имеет вид:

$$t = \frac{\Delta\Phi}{2\pi \cdot f_{\text{модуляции}}}$$

Далее, в соответствии с уравнением измерения расстояния time-of-flight сканера, дистанция до цели определяется следующим образом

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\Phi}{f_{\text{модуляции}}}$$

Для того чтобы лучше понимать эти параметры, можно снова использовать цифры. При частоте 10 МГц и фазовом разрешении 0,01 градуса (не представляет особой сложности при использовании стандартной электроники) мы получаем разрешение по z около 0,5 мм.

Сканеры с непрерывной модуляцией луча также имеют максимальный однозначный диапазон, подобно импульсным time-of-flight системам. Для этих систем диапазон ограничен тем, что вызывает фазовую задержку в синусоиде на один полный цикл. Уравнение для максимальной однозначной дальности в системе с непрерывной волной имеет следующий вид:

$$Z_{amb} = \frac{c}{2 \cdot f_{модуляции}}$$

В приведенном примере интервал составляет около 15 м (частота 10 МГц). Неопределенность измерения дальности пропорциональна Z_{amb} и обратно пропорциональна соотношению сигнал-шум (SNR). Чтобы обойти неудобство интервала неопределенности дальности, можно использовать несколько частотных волновых форм, в которых цель локализуется на низкой частоте (большая длина волны), а затем точное измерение выполняется на высокой частоте.

В сканерах последнего поколения, основанных на фазовом принципе, накладываются две или даже три волны с разными длинами волн. Самая длинная длина волны определяет уникальный диапазон, а самая короткая длина волны определяет точность, которую можно получить. Как правило, фазовые сканеры имеют более высокую скорость и лучшее разрешение, но меньшую точность, чем time-of-flight сканеры.

Как правило, точность фазового сканера ограничена:

- Частотой сигнала или модуляции.
- Точностью петли измерения фазы → Зависит от уровня сигнала, шума, ...
- Стабильностью генератора модуляции.
- Турбулентностью в воздухе, через который производится измерение.
- Колебаниями показателя преломления воздуха.

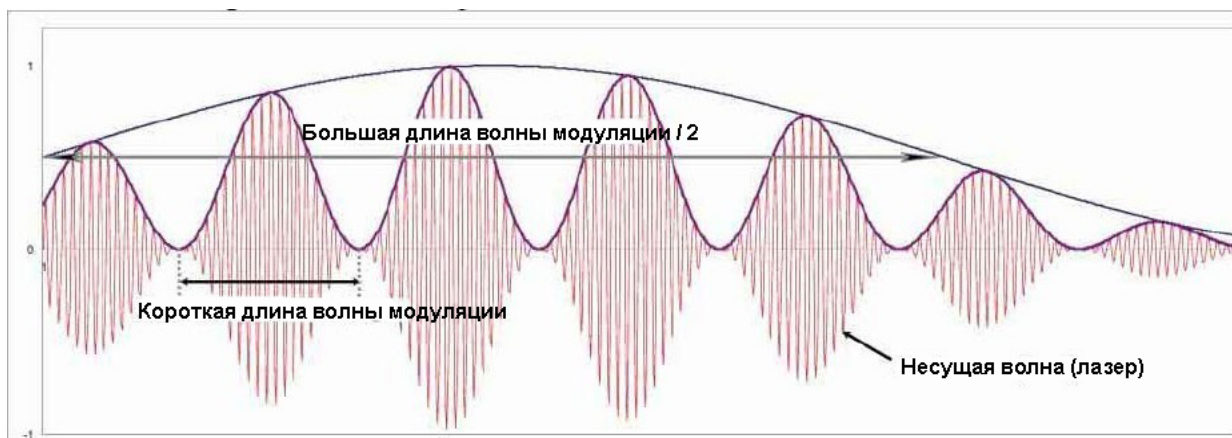


Рисунок 16 - Схематическое изображение двух длин волн модуляции и несущей волны для фазовой лазерной дальнометрии

Интерферометрия (когерентная)

Интерферометрия означает использование интерференции различных световых волн для фиксации трехмерных положений в пространстве. Оптическая интерферометрия используется с 19 века [7].

Из-за ограниченной интенсивности и когерентности обычных источников света измерения были ограничены расстояниями всего в несколько сантиметров. Только после изобретения лазеров эти ограничения удалось преодолеть. Лазеры позволили превратить интерферометрию в быстрый, высокоточный и универсальный метод измерения больших расстояний.

Интерферометрическое измерение расстояния может быть очень точным. Оно обеспечивает более высокую степень точности, чем импульсные time-of-flight методы или методы телеметрии с модуляцией луча. Однако он лучше всего подходит для измерений, проводимых в контролируемой атмосфере (например, в помещении) на расстояниях не более нескольких десятков метров.

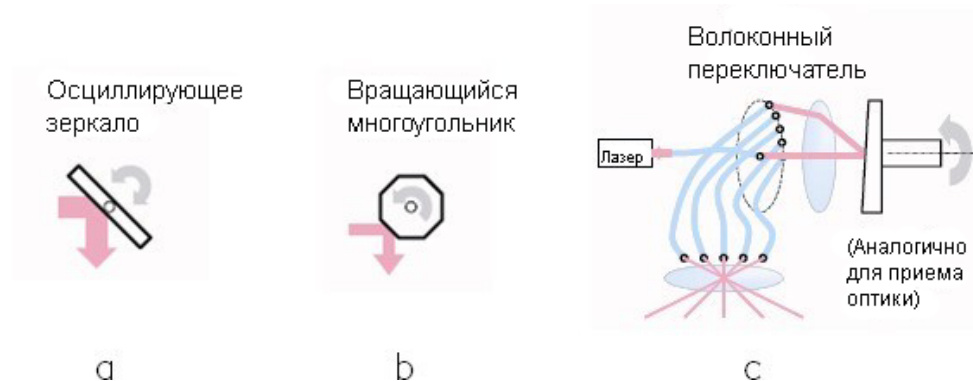
В интерферометрическом лазерном сканере лазерный луч разделяется с помощью делителя луча, который отражает половину луча в одном направлении (опорное плечо) и передает другую половину (измерительное плечо). Обе части луча движутся по разным путям, и когда лучи объединяются вместе, образуются интерференционные полосы. Очень малые смещения (порядка долей длины волны) могут быть обнаружены (с помощью обнаружения когерентности), а большие расстояния также могут быть измерены с низкой погрешностью измерения (путем подсчета длин волн). На этом принципе построено множество систем, например, многоволновая, голография и спекл интерферометрия. Эти системы имеют крайне высокую точность, но при этом являются весьма дорогостоящими.

2.5.3 Методы отклонения луча для систем измерения времени

Для измерения нескольких точек с одной и той же позиции сканера необходимо отклонить лазерный луч. При этом вместо перемещения непосредственно лазера используется отклоняющий блок. В большинстве отклоняющих устройств используется зеркало, поскольку оно намного легче и может вращаться быстрее и с большей точностью. Существует несколько методов отклонения лазерного луча в определенном направлении без необходимости перемещения самого сканера. Как правило, для этой цели используются три метода.

Одним из вариантов является использование колеблющегося зеркала, которое позволяет перемещать лазер вдоль линии. Комбинация двух зеркал позволяет отклонять луч в двух направлениях (см. рис. 20a). Чтобы увеличить скорость работы отклоняющего устройства и уменьшить сложность поворота зеркала и последующего его обратного поворота, исследователи придумали вращающуюся оптическую отражающую призму (см. рис. 20b). Этот принцип требует только одного направления вращения и поэтому является более быстрым. Недавно было введено использование волоконных переключателей, чтобы сделать системы более гибкими. Эти системы отклоняют лазерный луч в круг оптических волокон с помощью вращающегося зеркала (см. рис. 20c). Затем оптические волокна транспортируют луч в любом необходимом направлении. Преимуществами этой системы являются:

- Частота лазерных импульсов не связана с углом обзора
- Возможность получения очень плотной и регулярной схемы сканирования
- После заводской настройки не требуется калибровка
- Возможна установка лазера как в прямом, так и в боковом направлении



2.6 Метрологические аспекты: анализ погрешностей

Компании, производящие лазерные сканеры, публикуют данные о точности своих лазерных сканеров, демонстрируя преимущества конкретного продукта. Однако опыт показывает, что не следует беспрекословно доверять этим данным и что точность приборов, выпускаемых ограниченными сериями, варьируется от прибора к прибору и зависит от индивидуальной калибровки и аккуратности, проявленной при использовании прибора.

Каждое облако точек, созданное лазерным сканером, содержит значительное количество точек с грубыми ошибками. Если поставляемый продукт представляет собой облако точек, то точность съемки не может быть гарантирована в той же степени, что и при съемке обычными приборами. Многие исследователи уже опубликовали работы по тестированию точности лазерных сканеров (например, [11-15]). izmainz, часть Университета прикладных наук в Майнце и Институт геодезии и фотограмметрии Швейцарского федерального технологического института в Цюрихе [16] провели ряд тщательных работ по тестированию точности лазерных сканеров. Для систематического описания источников ошибок при лазерном сканировании они разделены на четыре категории: инструментальные, связанные с объектом, экологические и методологические ошибки.

2.6.1 Ошибки инструментального характера

Инструментальные ошибки могут быть как систематическими, так и случайными и обусловлены конструкцией сканера. Случайные ошибки в основном влияют на точность измерения дальности и угловое местоположение импульсных time-of-flight дальномеров. Систематические ошибки могут быть вызваны нелинейностью блока измерения времени или температурным дрейфом в электронике измерения времени, вызывающим дрейф диапазона среди прочих ошибок.

Распространение лазерного луча

Расхождением луча называется расширение лазерного луча с увеличением пройденного расстояния. Расходимость луча оказывает сильное влияние на разрешение облака, а также на погрешность позиционирования измеряемой точки. Расходимость луча может быть выражена следующим уравнением:

$$w(\rho_w) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot \rho_w}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2}$$

Где

ρ_w = дальность относительно места расположения ширины луча

w = радиус луча

w_0 = минимальный радиус луча (в начальной точке) = ширина луча

Предполагается, что отражение лазера имеет гауссову форму. Для больших диапазонов расходимость приблизительно линейна, и диаметр пучка выражается как положение, которое заключает в себе 86% полной мощности пучка в рамках гауссова распределения облученности



Рисунок 19 - Идеальное отражение, частичное освещение, частичная окклюзия

Практически, такое расхождение луча влияет на угловое положение измеряемой точки. Видимое местоположение наблюдения находится вдоль центральной линии испускаемого луча. Однако фактическое местоположение точки лежит где-то в проектируемом следе. Согласно экспериментальным данным, погрешность луча приблизительно равна одной четверти диаметра лазерного луча.

Смешанная краевая задача

Одним из наиболее важных последствий расхождения луча является проблема смешанных краев. Когда лазерный луч попадает на край объекта, луч разделяется на две части. Одна часть луча отражается от первой части края скачка, а другая часть проходит дальше и попадает на другую поверхность. В результате этого информация от одного лазерного импульса, которая передается обратно на приемник, поступает из двух разных точек в пространстве. Координаты такой точки относительно положения сканера будут рассчитаны на основе среднего значения обоих возвращенных сигналов, и поэтому точка будет находиться в неправильном месте.

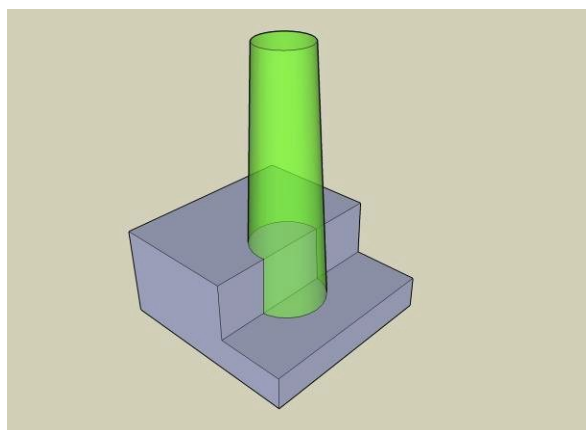


Рисунок 20 - Эффект смешанного края

При использовании сканирования с высоким разрешением на объекте вероятность попадания луча на край увеличивается, поэтому в полученных данных будет виден шум за краями объекта. Сканеры с

меньшей шириной луча помогают решить эту проблему, но ограничение дальности остается, поскольку ширина луча увеличивается с расстоянием.

Погрешность диапазона

Погрешность дальности может быть выражена как функция ряда параметров, основанных на типе лазерного сканера и принципе его работы.

Для триангуляционного сканера неопределенность дальности может быть выражена через:

$$\delta_z \cong \frac{Z^2}{fD} \delta_p$$

Где:

f это эффективное положение лазерного пятна (эффективное фокусное расстояние);

D является базовой линией триангуляции,

δ_p это неопределенность положения лазера - зависящая от типа датчика лазерного пятна, алгоритма детектора пиков, соотношения сигнал/шум и формы лазерного пятна изображения.

Z расстояние до поверхности

Для time-of-flight сканера мы уже знаем, что точность дальности зависит от механизма синхронизации. Это приводит нас к следующему уравнению:

$$\delta_z \cong \frac{c \cdot T_t}{2\sqrt{SNR}}$$

Где

T_t это время нарастания импульса.

SNR это отношение сигнала к шуму.

Большинство наземных сканеров среднего и дальнего радиуса действия обеспечивают погрешность в диапазоне от 5 мм до 50 мм в пределах 50 м. На этапе моделирования эти ошибки минимизируются путем усреднения или подгонки примитивных форм к облаку точек.

Как уже объяснялось, в сканерах на основе непрерывных волн.

Сравнение погрешности дальности между различными типами лазерных сканеров может быть проиллюстрировано на графике, как показано на рисунке, чтобы избежать необходимости использования высокоскоростных механизмов синхронизации путем модуляции лазерного сигнала. Погрешность дальности в лазерном сканере с амплитудной модуляцией зависит только от длины модулированной волны и отношения сигнал/шум и может быть описана следующим образом:

$$\delta_z = \frac{\lambda_m}{4\pi\sqrt{SNR}}$$

Угловая погрешность

Большинство лазерных сканеров используют вращающиеся зеркала для направления лазерного сигнала в определенном направлении. Небольшая разница в углах может привести к значительной ошибке координат при увеличении расстояния до сканера. Угловая точность зависит от любой ошибки в позиционировании зеркал и точности устройства для измерения углов. Поскольку положение отдельных точек трудно проверить, существует мало исследований этого вопроса. Как описано в работе Болера и др. [21], ошибки могут быть обнаружены путем измерения коротких горизонтальных и вертикальных расстояний между объектами (сферы) расположенных на одинаковом расстоянии от сканера, и сравнить их с

измерениями, полученными с помощью более точных методов съемки.

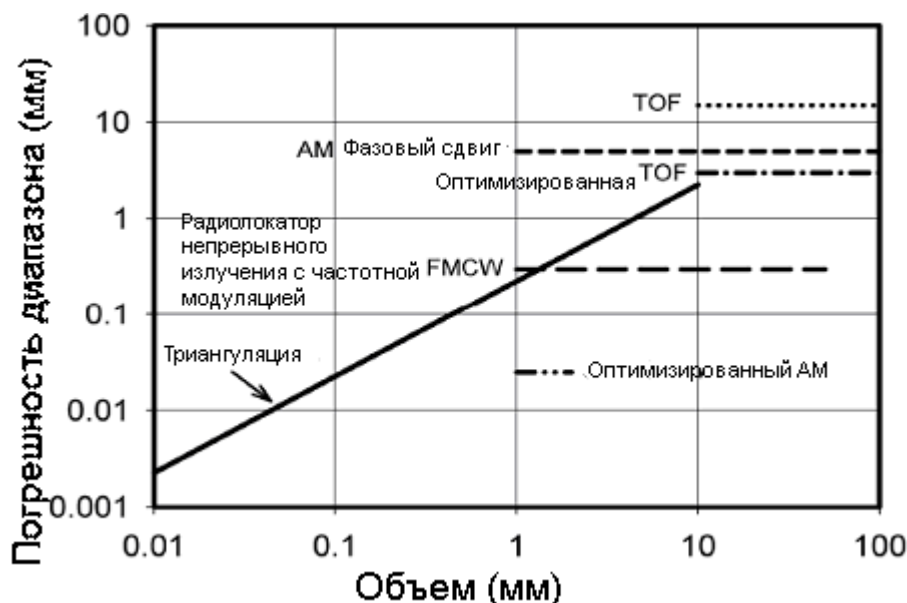


Рисунок 21 - Пгрешность дальности для различных принципов работы лазерного сканера

Ошибки по осям в TLS (Наземное лазерное сканирование)

При разработке процедур калибровки лазерных сканеров необходима геометрическая модель сканера. Поэтому мы определяем следующие оси:

- Вертикальная ось: Это вертикальная ось, которая позволяет дальномеру перемещать лазерный луч по горизонтали. В зависимости от типа сканера, панорамного или камерного, это ось вращения сканирующей головки или ось, ортогональная к осям двух взаимно ортогональных качающихся зеркал;
- Коллимационная ось: Это ось, проходящая через центр сканирующего зеркала и центр лазерного пятна на поверхности объекта;
- Горизонтальная ось: Это ось вращения сканирующего зеркала.

Вследствие производственных допусков данные оси не идеально выровнены, что приводит к ошибке коллимации, а также к ошибке горизонтальной оси.

2.6.2 Ошибки, связанные с объектом

Поскольку сканеры измеряют отражение лазерного луча от поверхности, нам приходится иметь дело с физическими законами отражения и оптическими свойствами материалов. Отражение монохроматического света от поверхности обычно показывает отраженные лучи во многих направлениях. Этот тип изотропного (диффузного) отражения (рис. 24) в общем случае может быть описан косинусным законом Ламберта:

$$I_{\text{отраженный}}(\lambda) = I_i(\lambda) \cdot k_d(\lambda) \cdot \cos(\theta)$$

Где

$I_i(\lambda)$ интенсивность падающего света как функция длины волны (цвета), (поглощается при прохождении через воздух)

$k_d(\lambda)$ коэффициент диффузного отражения, который также является функцией длины волны

θ угол между падающим светом и вектором нормали к поверхности.

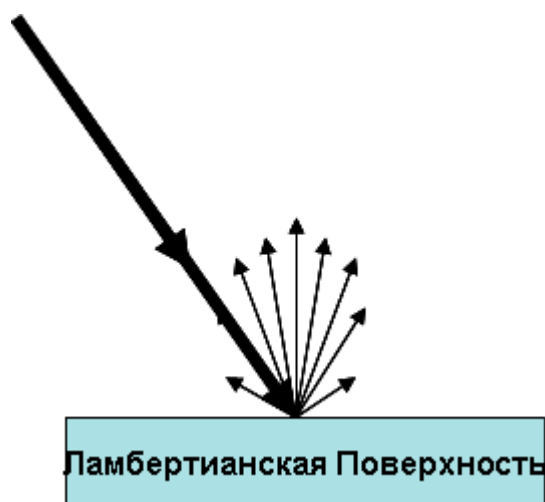


Рисунок 22 - Отражение от ламбертианской поверхности

Согласно этой формуле, на лазерный луч влияет поглощение сигнала, проходящего через воздух, отражение измеряемого материала и угол падения между лазерным лучом и измеряемой поверхностью. Из этого следует, что для очень темных (черных) поверхностей, поглощающих большую часть видимого спектра, отраженный сигнал будет очень слабым, следовательно, точность наведения будет искажена шумом. Поверхности с высокой отражательной способностью (т.е. яркие поверхности) дают более надежные и точные измерения дальности. Однако если отражательная способность объекта слишком высока (металлическая поверхность, светоотражающая лента ...), лазерный луч полностью отклоняется в направлении зеркального отражения и попадает на другую поверхность или распространяется на открытом пространстве. Это отклонение приводит к тому, что измеряемая точка не является точкой, на которую направлен лазер, а другой точкой или вообще никакой точкой. Этот тип шума называется спекл-шумом.

Регистрация поверхностей с различной отражательной способностью также приводит к систематическим ошибкам в дальности, иногда в несколько раз превышающим стандартное отклонение единичного измерения дальности.

Помимо отражательных свойств поверхности, на точность влияют и цветовые характеристики. Существуют значительные систематические расхождения в дальности, которые в целом можно соотнести с цветом каждой поверхности в зависимости от длины волны используемого лазера.

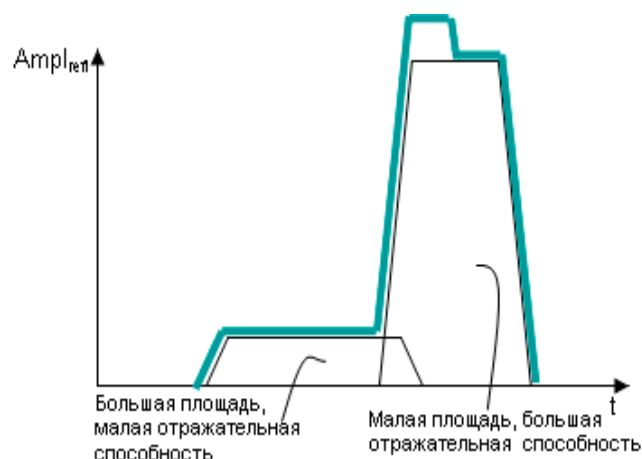


Рисунок 23 - Отклик сигнала при сканировании поверхностей с различной отражательной способностью

Помимо эффектов отражения, ряд материалов имеет полупрозрачное покрытие, которое позволяет лазерному лучу преломляться и отражаться в самом материале (например, дерево, мрамор, стиропор). Эти эффекты приводят к добавлению константы к измерениям расстояния, которую необходимо учитывать в расчетах.

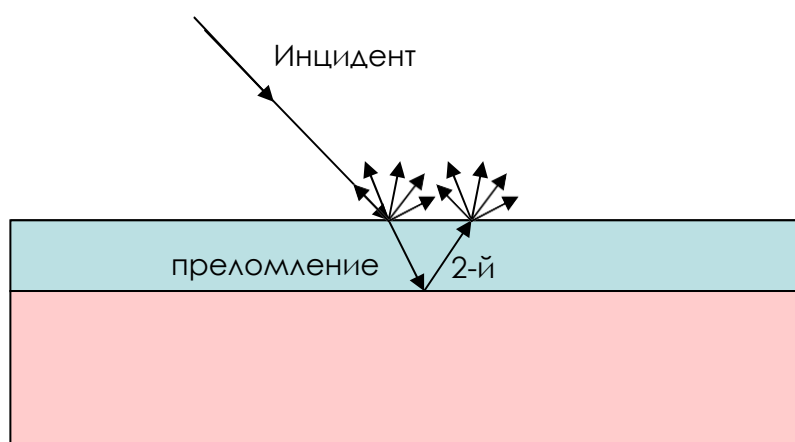


Рисунок 24 - Эффекты преломления в неоднородных полупрозрачных материалах

2.6.3 Условия окружающей среды

Температура

Следует отметить, что температура внутри сканера может быть намного выше температуры окружающей атмосферы из-за внутреннего нагрева или нагрева в результате внешнего излучения (например, солнца). Этот внешний источник излучения может нагревать одну сторону штатива или сканера, заставляя эту сторону расширяться, медленно искажая данные сканера.

Важна не только температура оборудования, но и температура сканируемой поверхности. При сканировании нагретой цели, например, в промышленной среде, фоновое излучение, вызванное горячей поверхностью, снижает соотношение сигнал/шум и, следовательно, точность измерений дальности.

Атмосфера

Работа лазерных сканеров происходит надлежащим образом исключительно при использовании в определенном диапазоне температур. Даже в этом диапазоне могут наблюдаться отклонения в измерениях, особенно в измерении расстояния.

Как и во всех операциях по измерению расстояния с помощью лазера, естественные ошибки возникают в первую очередь из-за атмосферных колебаний температуры, давления и влажности, которые влияют на коэффициент преломления и изменяют длину волны электромагнитной энергии. Это означает, что скорость лазерного излучения сильно зависит от плотности воздуха.

Большинство программного обеспечения для получения результатов лазерного сканирования предусматривает коррекцию этого преломления путем установки параметра преломления. Как правило, сканеры предварительно настраиваются с использованием стандартного параметра атмосферы ISO (15°C, 1013,25 hPa). При работе в атмосферных условиях, отличных от стандартной атмосферы, эти параметры необходимо адаптировать. Разница в температуре в 10°C или в давлении воздуха в 35 hPa приводит к ошибке расстояния сканирования в 1 мм/100 м.

В наземных условиях этот эффект может не оказывать серьезного влияния на результаты при коротких или средних расстояниях сканирования. Для измерений на больших расстояниях или высокоточного сканирования необходимо применять правильные атмосферные параметры.

Например, при работе в горном регионе снижение температуры можно оценить как 0,65°C/100м, а давление снижается на 10hPa/100м. Для станции сканирования, расположенной на высоте 2000 м, ошибка расстояния сканирования составит около 8 мм/100 м.

Интерферирующее излучение

Поскольку лазерные сканеры работают в очень узком диапазоне частот, на точность измерения дальности может повлиять внешнее излучение, например, от сильных внешних источников освещения. В приемном устройстве могут быть применены специальные оптические фильтры помех, позволяющие только правильным частотам достигать приемника.

Искажение в результате движения

Большинство лазерных сканеров сканируют со скоростью от 2000 до 500 000 образцов в секунду. Хотя это очень быстро, сканирование с высоким разрешением может занять 20-30 минут для некоторых времяпролетных сканеров и около 10 минут для фазовых сканеров. В течение этого времени сканер подвержен вибрациям в окружающей среде, вызывающим смещения. Мы называем это искажением от движения.

Поскольку выборка каждой точки происходит в разное время, любое движение субъекта или сканера искажает собранные данные. Поэтому сканер должен быть установлен на устойчивой платформе, чтобы минимизировать вибрации. Сам объект также должен быть неподвижен.

Следует отметить, что сканер также может двигаться из-за изменения температуры. К примеру, если солнце светит на одну сторону сканера, ножки штатива с этой стороны могут расширяться и медленно искажать данные сканирования (см. параграф 2.6.3.1). Новейшие сканеры, также называемые станциями сканирования, имеют встроенный двухосевой компенсатор, который компенсирует любое движение сканера в процессе сканирования.

2.6.4 Методологические погрешности

Методологические погрешности - это ошибки, обусловленные выбранным методом съемки или опытом работы пользователя с данной технологией. Например, если пользователь установит плотность сетки (разрешение) выше, чем точность лазерного сканера в каждой точке, то сканирование будет избыточным. При избыточной дискретизации сканирования возникает дополнительный шум, и требуемое время обработки резко возрастает. Другой возможный источник

ошибкой может быть неправильный выбор сканера. При выборе сканера с максимальным диапазоном, близким к максимальному диапазону сканируемого объекта, эти снимки будут содержать меньше точных измерений и возможный шум.

В рамках этой темы также классифицируются возможные ошибки, возникающие на этапе регистрации или консолидации. В зависимости от техники, используемой для регистрации нескольких облаков точек, возникают ошибки. Эти ошибки возникают как при косвенной регистрации/геопривязке, так и при прямой регистрации/геопривязке.

2.7 Современное лазерное сканирующее оборудование

Современные лазерные сканеры полностью интегрированы для более быстрой настройки. Они объединяют сканер, панель управления, внутренний накопитель и аккумулятор в одном устройстве. Специальные двухосевые компенсаторы также интегрированы для автоматического выравнивания сканера. Некоторые сканеры имеют крепления для установки GPS-приемников и/или компенсаторов INS для прямого позиционирования и ориентации сканера в пространстве. Для добавления цветной информации высокого разрешения к измеренным облакам точек некоторые сканеры интегрируют высококачественные цифровые камеры или оснащают монтажным устройством.

Технология лазерного сканирования постоянно развивается:

- Специальные цели со встроенными GPS-приемниками устраняют необходимость регистрации целей с помощью тахеометров.
- Фильтрация однородного облака точек на аппаратной основе
- Объединение в одном сканере лучшего из time-of-flight и фазовых сканеров

3. Применение лазерного сканирования на практике

Использование лазерного сканера для сканирования здания - это не просто нажатие кнопки и ожидание результатов. Для этого необходимо глубокое знание оборудования и процесса сканирования. Некоторые этапы процесса сканирования достаточно автоматизированы, в то время как другие все еще трудоемки. В этой главе рассматривается процесс наземного лазерного сканирования.



Рисунок 25 - Трубопровод наземного лазерного сканера

3.1 Планирование исследований¹

В настоящее время не существует стандартной процедуры планирования съемки для наземного лазерного сканирования. Однако, по мнению сообщества пользователей лазерного сканирования, планирование съемки должно, по крайней мере, содержать следующие темы (см. рис. 26):

- Определение целей и задач
- Анализ территории, подлежащей обследованию
- Определение методов измерения и оборудования
- Управление данными

3.1.1 Определение целей и задач

Одним из ключевых вопросов при регистрации объекта являются цели и задачи клиента. Чтобы полностью понять потребности и запросы клиента, необходимо ответить на некоторые вопросы.

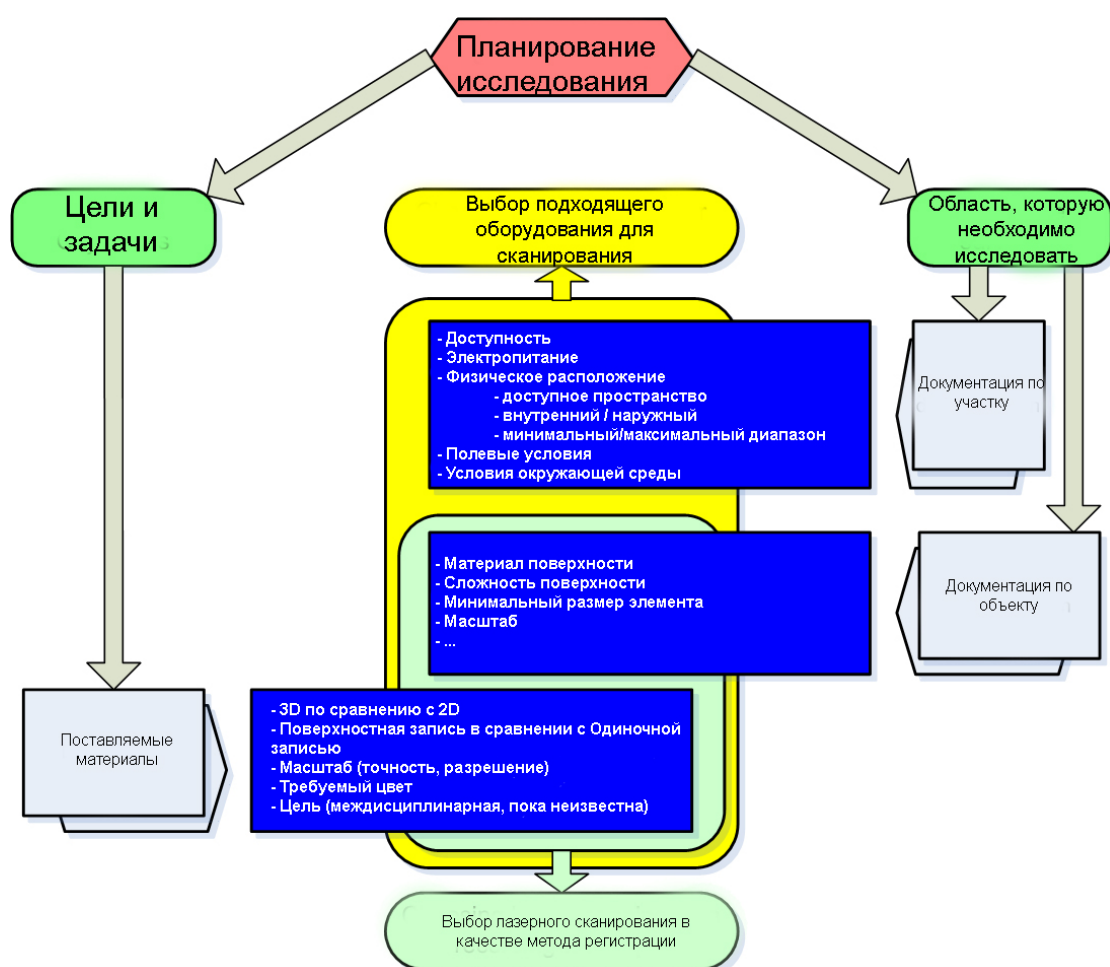


Рисунок 26 - Блок-схема планирования исследования

¹ Этот параграф можно сравнить с заметками о планировании метрических исследований

- Почему клиент хочет, чтобы этот объект был зафиксирован, и что он/она хочет делать с зафиксированными данными?
- Причина регистрации объекта или здания может дать представление о требованиях к результатам и их точности. Часто клиент может думать, что лазерное сканирование является идеальным инструментом для решения его проблемы, потому что он слышал, что конкурирующая фирма использовала лазерный сканер. Или, наоборот, клиент может бояться использовать лазерное сканирование для регистрации своего здания, потому что он настроен скептически и полагается на использование традиционных методов. Выслушав требования клиента, можно предложить рекомендации по выбору подходящего метода измерения.
- Какие результаты требуются?

В непосредственной связи с причинами, побуждающими к проведению записи, необходимо определить требуемые результаты. Эти результаты могут варьироваться от 2D планов и высот до 3D моделей или даже 3D анимации. В некоторых случаях клиенту может понадобиться только необработанное облако точек для архивирования. Особенно важен уровень детализации (минимальный размер элементов) результатов, поскольку он помогает определить ожидаемое разрешение (т.е. плотность точек).

3.1.2 Анализ территории, подлежащей исследованию

Сбор как можно большего количества информации об объекте, подлежащем съемкам, дает представление о сложности и времени, необходимом для выполнения определенной задачи. Как уже упоминалось в предыдущем параграфе, требуемое разрешение и точность записи зависят либо от масштаба участка съемки, либо от минимального размера объекта, который должен быть различим в конечных результатах. Полевые заметки, отчеты, карты, фотографии или видеосъемка участка могут помочь в определении возможных опасностей при регистрации объекта, как и предыдущие исследования, которые могли быть созданы с помощью других средств регистрации (ручные измерения, данные GPS или тахеометра).

Полезную информацию может дать не только само здание, но и его окружение. На участке могут быть разбросаны препятствия, ограничивающие возможные позиции установки лазерного сканера, или даже могут быть временные ограничения на вход на участок (например, запись туннелей метро). Косвенно возможные позиции установки лазерного сканера определяют минимальную и максимальную дальность, которую сканер должен иметь возможность регистрировать.

Используя все эти данные, можно принять решение о надлежащей технике записи, а если выбрано лазерное сканирование, то определить тип сканера. Лазерное сканирование - это высокоразвитая техника, но она не всегда является наиболее эффективным решением для каждой проблемы. Иногда гораздо проще и экономичнее по времени использовать другую технику записи. Возможными причинами выбора лазерного сканирования являются:

- Очень сложная структура поверхности (органические формы)
- Требуются трехмерные результаты
- Требование к измерениям поверхности вместо измерений отдельных точек
- Записи данных, которые могут быть использованы многопрофильной командой для различных целей
- Архивирование без априорного знания о будущем использовании
- Ограничение доступа
- И т.д.

3.1.3 Определение оптимальных мест для сканирования

После сбора документации на участке и выбора лазерного сканирования в качестве наиболее эффективного метода регистрации, необходимо спланировать места сканирования и цели.

Необходимо выбрать оптимальное расположение сканирующей станции, чтобы гарантировать максимальный охват

и точность при минимизации количества установок. Как уже упоминалось в параграфе 2.6, точность измерения зависит от диаметра следа при данной установке сканера, что указывает на то, что угол падения (см. рис. 30) и дальность до объекта имеют большое значение при определении положения сканера. Тщательный анализ определения оптимальной конфигурации сканера для достижения требуемой точности описан в [26]. В следующем списке приведен набор приоритетных правил, которые следует иметь в виду при определении оптимального положения сканера.

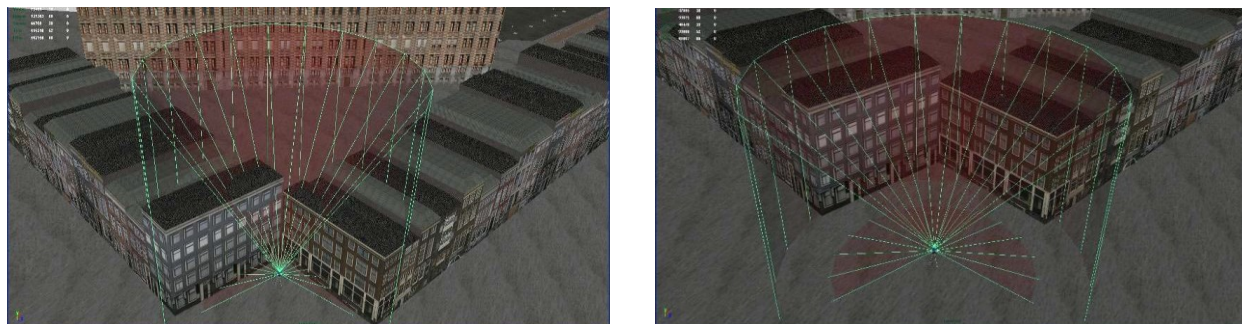


Рисунок 27 - Плохое позиционирование сканера, содержащего слишком наклонные углы (слева) - Хорошее позиционирование сканера (справа)

- Убедитесь, что выбраны позиции, обеспечивающие большой охват территории без препятствий в зоне прямой видимости и создающие наименьшее количество теней.
- Проверьте, соблюдаются ли минимальные/максимальные пределы дальности действия сканера для достижения определенной точности, чем больше расстояние до объекта, тем ниже точность и разрешение.
- Минимизируйте образование малых углов пересечения, под острыми углами лазерный луч отражается от сканера не столь эффективно, что приводит к снижению точности.

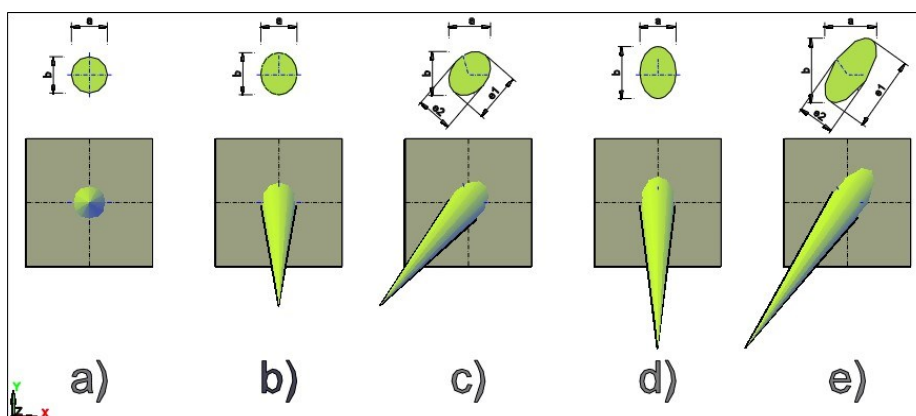


Рисунок 28 - Лазерный след при сканировании под разными углами

- Старайтесь уменьшить количество позиций сканирования.
- Другие важные факты, которые следует принять во внимание:
- Здоровье и безопасность
- Окружающая среда (вибрации, ветер...)
- Возвышение сканера над землей
- Видимость искусственных или естественных целей

3.1.4 Определение оптимального расположения цели

Наряду с оптимальным расположением сканера важны также типы целей, их расположение и/или геометрическая конфигурация. Мишени в основном используются для регистрации сканов, полученных из разных положений сканера. В настоящее время существует большое разнообразие типов мишеней: светоотражающие мишени, сферические мишени, бумажные мишени, призмные мишени... В ближайшем будущем появятся даже мишени со встроенными GPS-приемниками.

Важным замечанием при использовании мишеней является то, что они должны быть широко разбросаны не только в направлении x и y , но и в направлении z . Об этом часто забывают, и иногда все мишени просто размещают на земле.

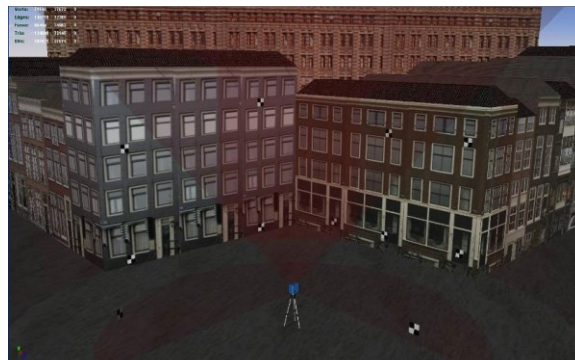
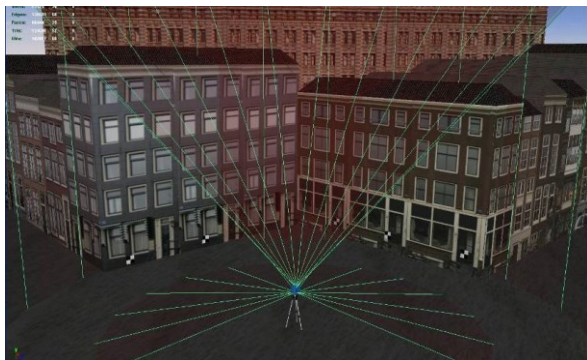


Рисунок 29 - Плохая конфигурация цели (слева) - Хорошая конфигурация цели (справа)

В некоторых конфигурациях целей не существует уникального решения для процесса регистрации. Например, если все мишени расположены на одной линии, остается одна свободная степень, а именно вращение вокруг этой линии.

Специальные светоотражающие мишени и сферические мишени часто предоставляются компаниями-разработчиками сканеров. Эти мишени предназначены для отражения большей части лазерного луча обратно в сканер. Поэтому сканер может автоматически обнаруживать такие мишени и после тонкого процесса сканирования определять точный центр путем подгонки примитивной формы к измеренному облаку точек.

Иногда используются бумажные мишени, поскольку они намного дешевле, чем светоотражающие или сферические мишени. В некоторых случаях на головке сканера закрепляется светоотражающая призма. Зная смещение между отклоняющим зеркалом сканера и призмой, можно определить положение сканера путем измерения призмы тахеометром.



Рисунок 30 - Виды искусственных целей

В зависимости от используемого метода фиксации, в каждом скане должно быть не менее 4 соответствующим образом распределенных контрольных точек/целей XYZ. Более подробное объяснение методов регистрации и соответствующих оптимальных конфигураций мишеней описано в параграфе 3.5.

3.1.5 Управление данными

Необходимо предусмотреть хранение данных до начала сканирования. Например, при использовании Leica HDS4500 размер 1 скана составляет примерно 140 Мб. В среднем за день сканирования может быть сделано 20-30 сканов, в результате чего образуется набор данных объемом около 7 Гб. Это требует тщательного планирования.

3.2 Работа в полевых условиях

3.2.1 Подготовка к исследованию

Этап подготовки к съемке включает принятие решения о методе для регистрации, который будет использоваться. Эти методы можно разделить на три категории: регистрация с использованием трехмерного повторного секционирования сканируемых объектов, регистрация путем установки лазерного сканера над известными контрольными точками и регистрация с использованием облачных ограничений (более подробно см. главу 3.5).

3.2.2 Настройка сканера

Настройка лазерного сканера в целом соответствует процедуре, аналогичной настройке тахеометра. Выполняются следующие шаги (Рисунок 31):

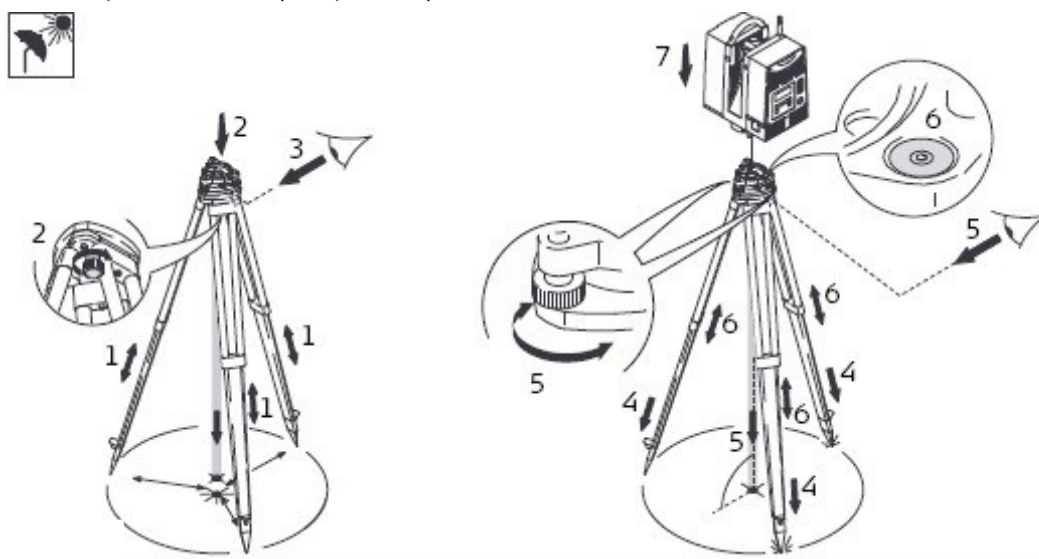


Рисунок 31 - Настройка лазерного сканера

- Установите штатив: Откройте штатив и выдвиньте ножки. Убедитесь, что штатив стоит на устойчивом основании. Обычно сканер располагается на уровне глаз. Если необходимо отсканировать площадь пола, выгодно установить сканер еще выше, так как он обеспечивает лучший угол наклона.
- Установите сканер на штатив и зафиксируйте его.
- В зависимости от техники регистрации, сканер может быть расположен над известной контрольной точкой.
- Выровняйте сканер: Изменяя длину двух ножек штатива, используемых для установки штатива, выровняйте верхнюю поверхность штатива с помощью уровня "бычий глаз". Пузырь должен находиться в пределах внутреннего круга. Будьте максимально точны. При позиционировании сканера над контрольной точкой эта процедура не должна изменить точку, над которой вы находились в шаге 3.

3.2.3 Запись информации

Перед началом сканирования непосредственно сканирующее устройство должно быть подключено к ноутбуку, способному получать и сохранять все точки, поступающие со сканера, и управлять свойствами сканера. Питание сканера может осуществляться от батарей, генератора или непосредственно от сети.

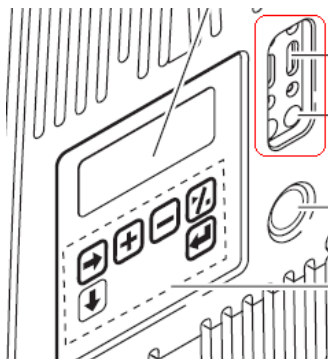


Рисунок 32 - Полностью интегрированное сканирование и управление на современных сканерах

В последнее время TLS может хранить данные на внутреннем или съемном жестком диске.

3.2.4 Параметры сканера

После установки соединения со сканером программа контроллера сканирования должна указать параметры, которые будут использоваться в процессе сканирования.

Таргетинг

Хотя большинство современных сканеров могут сканировать на все 360° (рис. 35), это не всегда требуется. Поэтому нам необходимо определить область сканирования. Для этого существует несколько вариантов.

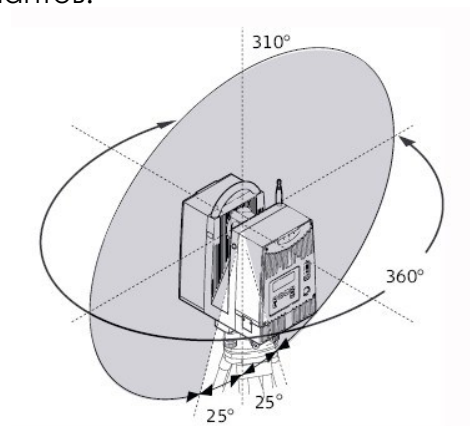


Рисунок 33 - Поле обзора современного сканера

Некоторые сканеры имеют минимизированную панель управления на самом сканере, с помощью которой можно определить целевую область. Это очень грубый способ определения целевой области, но очень быстрый.

В основном, область прицеливания определяется с помощью управления сканером в программном обеспечении. Using this type of

При использовании данного типа таргетинга мы сначала получаем изображение сцены, которое позволяет выбрать целевую область. В настоящее время сканеры имеют встроенные фиксированные камеры или даже видеокамеры, позволяющие демонстрировать пользователю, что именно видно сканеру. Используя программное обеспечение для управления сканированием, пользователь может выбрать целевую область с помощью поля выбора, аналогично выбору части изображения в программе обработки изображений.

Большинство фазовых сканеров не имеют камеры из-за своей технической конструкции. Однако эти сканеры могут регистрировать такое количество точек в секунду, что создание скана с низким разрешением занимает столько же времени, сколько и съемка другим сканером. Это сканирование с низким разрешением может быть использовано для выбора целевой области.

Разрешение

Ключевым вопросом при выполнении проекта лазерного сканирования является выбор правильного разрешения. Разрешение определяется как расстояние между двумя последующими измеренными точками и, таким образом, определяет плотность точек в облаке точек. Часто люди путают точность с разрешением. Хотя между ними существует определенная связь, они все же определяют разные аспекты процесса лазерного сканирования.

Разрешение в основном зависит от мельчайших деталей структуры поверхности, которые должны быть различимы в конечном результате. Поэтому оно также напрямую связано с масштабом конечного результата. Фактически, лазерные сканеры преодолевают интеллектуальную обработку, выполняемую человеком при анализе здания (т.е. разделение здания на плоскости, линии и точки), путем записи огромного набора точек с избыточной информацией. Например, в гладких областях, таких как плоскости, для моделирования объекта требуется меньше точек, в то время как в областях с большой кривизной требуется гораздо больше точек, иногда даже больше, чем может предоставить лазерный сканер.

Следует отметить, что чем выше выбранное разрешение, тем больше точек необходимо отсканировать и, следовательно, тем больше времени это займет. Помимо времени, увеличивается размер хранилища данных. Оператору следует помнить, что сканирование с более высоким разрешением, чем точность сканера по одной точке при измерении расстояния, может привести к передискретизации и, соответственно, к увеличению шума в конечном наборе данных.

Поскольку большинство лазерных сканеров работают с постоянным изменением угла между двумя последовательными точками (на основе полярных координат), разрешение сканера определяется на заданном расстоянии до сканера. Это расстояние может быть введено вручную через программное обеспечение, или датчик может захватить значение расстояния до точки и определить разрешение на этом расстоянии от сканера. Точки, отсканированные дальше этого расстояния, будут иметь более низкое разрешение, а точки, отсканированные ближе, - более высокое. В общем случае рекомендуется брать точку зонда в самой удаленной точке, подлежащей сканированию.

Некоторые программы управления сканированием обеспечивают быструю настройку разрешения, т.е. низкое, среднее или высокое разрешение. Эти быстрые настройки устанавливают разрешение на определенное значение для определенного расстояния. В руководстве к сканеру приводятся таблицы, иллюстрирующие эффективное разрешение на нескольких расстояниях для каждой настройки.

Организация English Heritage, вневедомственный государственный орган Великобритании, обладающий значительным опытом в управлении исторической средой, создала таблицу, которая помогает пользователю определить подходящее разрешение для проекта.

Эта таблица составляется на основе следующей формулы:

$$Q = 1 - \left(\frac{m}{\lambda} \right)$$

Где Q - качество данных, m - плотность точек (разрешение) на объекте, а λ - минимальный размер элемента, или требуемая плотность точек. Таким образом, значение Q указывает на уровень, до которого был отсканирован объект.

размер элемента	пример элемента	плотность точек, необходимая для обеспечения 66% вероятности того, что объект будет виден	плотность точек, необходимая для обеспечения 95% вероятности того, что объект будет виден
10000 мм	большие земляные работы	3500mm	500mm
1000 мм	мелкие земляные работы/копание	350mm	50mm
100 мм	крупная каменная кладка	35mm	5mm
10 мм	кремневые заготовки/крупные следы от орудий труда	3.5mm	0.5mm
1 мм	Выветрившаяся каменная кладка	0.35mm	0.05mm

Рисунок 34 - Соответствующая плотность точек (разрешение выборки) для различных размеров объектов культурного наследия

Первичная фильтрация

В процессе сканирования данные сканирования могут быть отфильтрованы с помощью первичных фильтров, которые иногда также называют аппаратными фильтрами. Предусмотрены различные варианты: фильтрация по диапазону, фильтрация по значению отражательной способности или комбинация обоих вариантов. Первичная фильтрация может быть использована для того, чтобы убедиться, что собранные данные находятся в пределах точности диапазона сканера, или для удаления точек с низкими значениями отражательной способности, поскольку они, вероятно, недостаточно точны.

3.3 Сбор данных

3.3.1 Сканирование объекта (здания)

После определения зоны обзора и установки надлежащего разрешения можно приступить к самому сканированию. Процесс сканирования практически полностью автоматизирован. После нажатия кнопки управления в программе управления сканированием или непосредственно на пульте управления сканером, сканер перемещается в начальную точку и начинает собирать точки. Эти точки сохраняются ноутбуком или во внутренней памяти самого сканера. Когда ноутбук подключен к сканеру, отсканированные точки непосредственно визуализируются на экране в трех измерениях и дают представление об уже отсканированной области. После сканирования рекомендуется проверить скан на наличие непредвиденных препятствий, которые приводят к появлению окклюзионных областей в данных сканирования.

В большинстве программ управления сканированием параметры цели и параметров могут быть запрограммированы, поэтому впоследствии можно сканировать несколько областей с разным разрешением. Можно создать сценарий, позволяющий сканировать определенные области с более высоким разрешением во время выполнения общего сканирования, чтобы в процессе регистрации можно было использовать более четкие характеристики в качестве регистрационных признаков.

В зависимости от выбранного разрешения и целевой области, процесс сканирования может занять от 5 минут до 120 минут или даже больше. За это время необходимо сделать записи о съемке или, если эскиз окрестностей не был сделан во время планирования съемки, это самое время сделать. На эскизе и записях должны быть показаны/описаны сканируемые объекты, позиции целей и их метки, а также позиции сканирования.

Следует также отметить конкретные внешние условия, влияющие на сканирование, и используемые настройки сканера.

Сканирование целей

В случае использования искусственных и/или естественных целей для фиксации сканов на этапе регистрации (см. параграф 3.5), данные цели должны быть обозначены и тщательно измерены.

Из-за ограниченной скорости time-of-flight сканера, сканирование проводится в два этапа. Сначала объект сканируется с разрешением, которое подходит для достижения требуемых результатов. На втором этапе производится точное сканирование объектов (рис. 39) для достижения более высокой точности при определении их центрального положения. Однако в общественных местах было бы полезно сначала отсканировать цели, а затем сканировать субъекта, чтобы избежать возможного перемещения целей.

После завершения глобального сканирования (фаза 1) большинство программ управления сканированием предоставляют инструменты для автоматического обнаружения искусственных целей в сканировании. Поскольку эти искусственные цели изготовлены из материала с высокой отражательной способностью, их значение намного выше, чем у окружающей среды. Однако, поскольку эти средства автоматического обнаружения часто дают ошибочные результаты, рекомендуется всегда проверять результаты и убедиться, что ни одна цель не пропущена.

После того как известны приблизительные положения искусственных целей, их сканируют в высоком разрешении (фаза 2). Затем программное обеспечение для управления сканированием может автоматически подогнать к мишени определенную форму и определить ее точную центральную точку.

Иногда вместо искусственных целей или вместе с ними используются точки детализации. Точка детализации - это геометрическая точка, которая хорошо различима и может быть точно определена благодаря своей форме. Эти точки также сканируются в очень высоком разрешении. Хорошей практикой является ручная вставка вершины для этой естественной цели и ее маркировка на месте, чтобы уменьшить проблемы с неправильной интерпретацией на этапе обработки.

Важно отметить, что фазовые сканеры последнего поколения сканируют с высокой скоростью, поэтому сканирование 360° с очень высоким разрешением может занять всего 5-10 минут. Цели автоматически сканируются с высоким разрешением, поэтому их не нужно повторно сканировать. Такой способ работы, конечно, намного быстрее, поскольку пользователю не нужно определять и точно сканировать эти цели на месте. Однако маркировка целей теперь должна выполняться в офисе и требует очень хороших полевых заметок и зарисовок местности.

3.3.2 Измерение целевых параметров

Частью процесса сканирования является регистрация целей с помощью тахеометра. Если необходимо установить несколько тахеометров, следует выполнить траверс или резекцию, чтобы минимизировать ошибки в процессе записи. Поскольку предполагается, что студенты, работающие с этим учебником, имеют опыт геодезической съемки, этот процесс подробно не описывается.

3.3.3 Контроль полноты информации

После завершения сканирования, как уже упоминалось, очень важно дважды проверить полноту сканирования. Осознание отсутствия детали в данных сканирования в офисе может привести к дорогостоящему повторному визиту на объект. Второй выезд может потребовать больше времени, чем проверка полноты на месте во время первого визита. При работе с ноутбуком в этом может помочь разделение точек (см. параграф 3.6.1).

3.4 Подготовка данных

По возвращении в офис данные анализируются и сравниваются с полевыми зарисовками и заметками. Рекомендуется начинать работу с копии оригиналов сканов и хранить оригиналы в качестве резервной копии. Различные типы сканеров сохраняют информацию облака точек в разных форматах. Для целей архивирования важно, чтобы формат файла был легко доступен и узнаваем. Если к нему можно получить доступ напрямую, без декодирования, то впоследствии он может быть легко преобразован в любой другой формат, читаемый соответствующим программным обеспечением. Формат файла также должен содержать данные в самом примитивном формате, вместо того чтобы использовать наиболее предпочтительный формат для переработки.

Всегда добавляйте к резервным файлам файл мета-данных, содержащий полевой эскиз, полевые заметки и все данные, собранные еще на этапе подготовки к сканированию.

Перед обработкой облаков из набора данных удаляются сканы, пострадавшие от экстремальных условий окружающей среды, или ошибочные сканы, возникшие из-за ошибок человека. Сканы, которые не были удалены, необходимо расставить по приоритетам в соответствии с "наилучшими видами". Расстановка приоритетов осуществляется с помощью полевых заметок и зарисовок.

В некоторых случаях также требуется очистить некоторые сканы перед этапом регистрации. Когда цели расположены очень далеко от сканера или из-за определенных условий окружающей среды, точные сканы целей могут быть загромождены шумом. Этот шум необходимо удалить перед регистрацией сканов, поскольку он повлияет на точность этапа регистрации.

3.5 Регистрация и привязка к местности

В большинстве случаев сканируемый объект слишком велик, чтобы его можно было отсканировать только с одной позиции. Поэтому требуется несколько позиций сканирования. Каждая позиция сканирования определяется в системе координат сканера. Чтобы выровнять различные позиции сканирования, необходимо знать точное положение и ориентацию этих систем координат сканера в соответствии с локальной/глобальной системой координат объекта.

Непосредственно с выравниванием, или регистрацией, связана геопривязка всего набора данных. Геопривязка означает не только выравнивание сканов, но и привязку набора данных к фиксированной системе координат. В следующих параграфах будут описаны возможности регистрации и геопривязки.

В этих заметках методы регистрации подразделяются на прямые и косвенные методы регистрации или геопривязки.

3.5.1 Косвенная регистрация и геопривязка

Косвенная регистрация подразумевает использование целевых объектов (искусственных или естественных) непосредственно на месте съемки для выравнивания наборов данных. Если требуется географическая привязка, сами объекты должны быть зарегистрированы и преобразованы в известную систему координат с использованием признанных методов геодезии.

Для выполнения косвенной регистрации необходимо как минимум три соответствия целей между двумя сканами. Однако всегда лучше иметь более трех, чтобы можно было минимизировать ошибки путем оптимизации по методу наименьших квадратов.

Легкодоступные места не представляют проблемы для размещения мишеней. Искусственные мишени бывают разных форм. Существуют специальные мишени от компаний-производителей лазерных сканеров, изготовленные из высоко отражающего материала, но можно использовать и напечатанные бумажные мишени. Если нет принтера или специальных мишеней, мишени можно импровизировать, используя объекты с идеальной геометрической поверхностью.

Например, в качестве мишени можно использовать куски цилиндрической трубы. Используя программное обеспечение для обработки сканирования, идеальный цилиндр может быть подогнан к тонкому скану такого объекта для определения центральной оси с очень высокой точностью. Если цилиндры затем разместить как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, их можно использовать для выравнивания различных сканов.

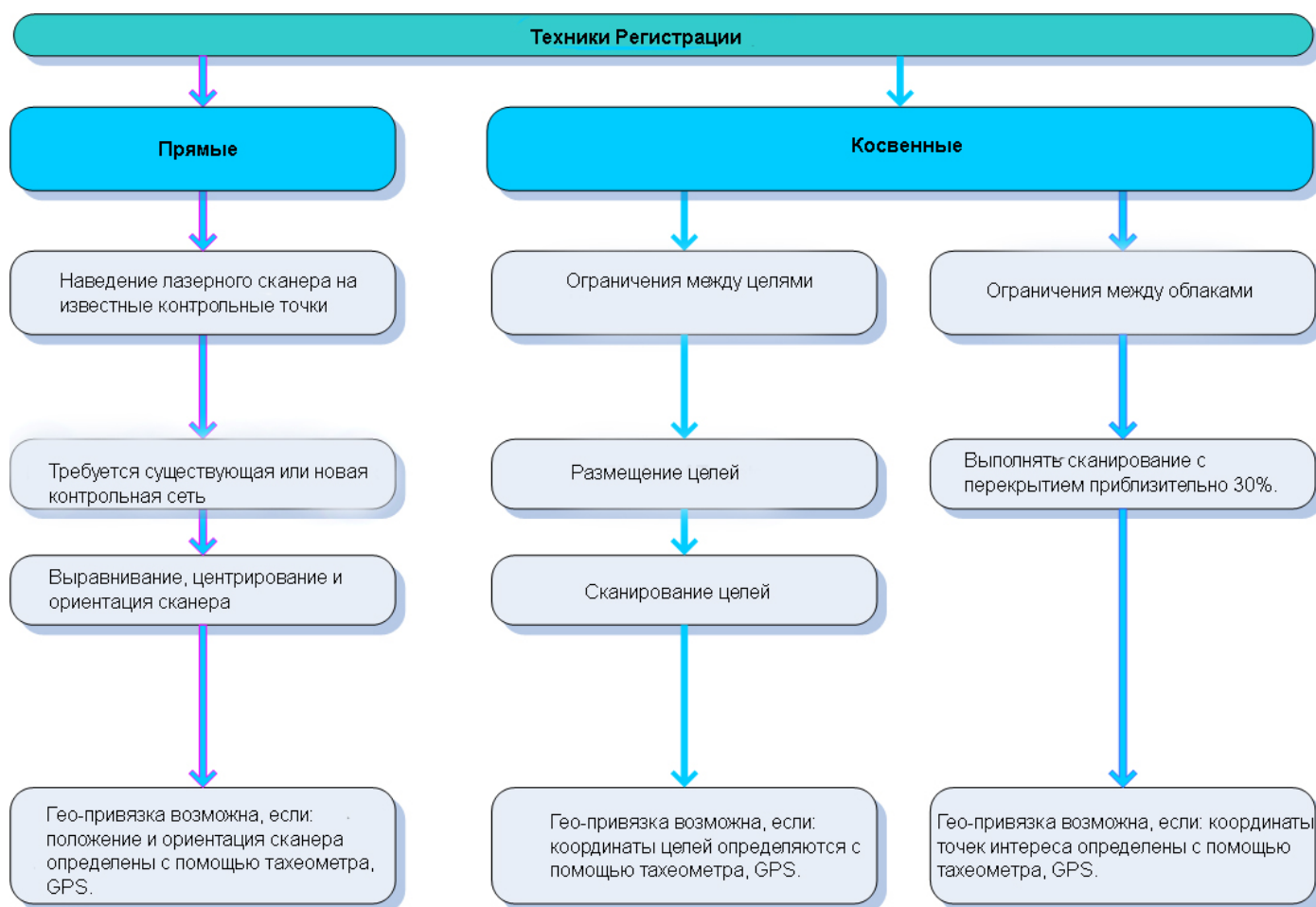
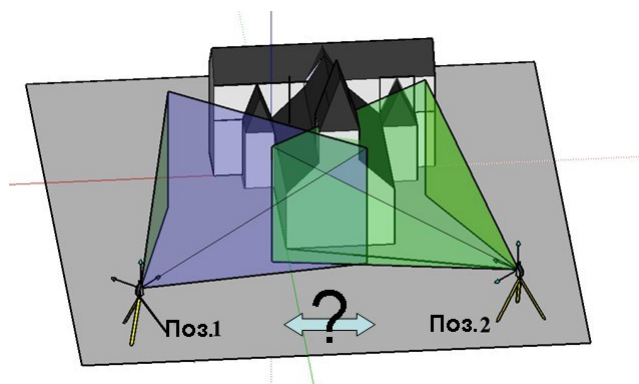


Рисунок 35 - Регистрация между двумя соседними сканами (вверху) - Техника регистрации (внизу)

Регистрация от цели к цели

В труднодоступных местах, например, на слишком большой высоте, можно использовать естественные цели. Естественные цели - это точки объекта, которые можно определить с высокой точностью, например, края окон или карнизы. Как утверждает организация English Heritage в своей публикации [28], результаты регистрации, полученные с помощью этих естественных целей, хуже, чем при использовании искусственных целей. Это объясняется двумя причинами:

- Общие черты в различных облаках точек не состоят из одинаковых точек, которые, по сути, являются кругами диаметром несколько мм из-за расхождения лазерного луча;
- Идентификация общих особенностей довольно субъективна, особенно на очень наклонных сканах.

Регистрация в облаке

Другим способом регистрации двух облачных карт является использование наложения точек. Если два таких облака имеют достаточное перекрытие (обычно 30-40%), то для выравнивания обоих наборов данных можно использовать метод, называемый итеративной обработкой закрытых точек или ICP.

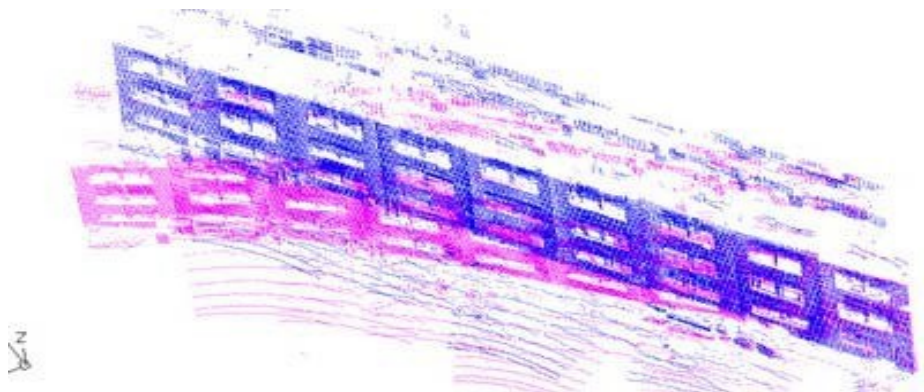


Рисунок 36 - Распространение ошибок при регистрации нескольких сканирований фасадов в облаке

Эта техника требует от пользователя вручную выбрать как минимум 3 соответствующие точки в облаках точек. Поскольку эти 3 точки никогда не будут точно совпадать (см. объяснение в предыдущем параграфе), алгоритм ICP итеративно проверяет расстояния между всеми точками облаков точек и оценивает преобразование для выравнивания обоих наборов, что приводит к минимальной ошибке.

Правила конфигурации целей, упомянутые в предыдущем параграфе, также применимы к конфигурации точек при регистрации облаков.

Этот метод регистрации следует использовать с осторожностью. При сканировании длинных линейных структур, где требуется несколько установок, небольшие ошибки в каждой паре регистрации могут распространиться и привести к большим глобальным ошибкам.

Регистрация между поверхностями

В 2006 году А. Груен опубликовал новый метод выравнивания наборов данных путем согласования геометрии поверхности двух сканов. Его алгоритм оценивает евклидово расстояние между участками поверхности методом наименьших квадратов и пытается минимизировать это расстояние итеративно, как в алгоритме ICP. Этот метод обеспечивает высокую гибкость для решения любых задач трехмерного соответствия поверхностей, а также статистические инструменты для анализа качества конечного результата.

Регистрация между поверхностями особенно полезна, когда некоторые сканы содержат значительное количество шума. В этом случае лучше сначала очистить и сгруппировать отдельные сканы, чтобы каждый из них можно было обработать с использованием соответствующих настроек. Когда все сканы преобразованы в поверхности, можно использовать регистрацию между поверхностями для выравнивания различных сканов.

3.5.2 Прямая регистрация и привязка к местности

Прямая регистрация означает, что положение и ориентация сканера вычисляются напрямую. Это может быть сделано двумя способами. Одним из примеров является лазерный сканер с некоторыми возможностями тахеометра, где сканер может позиционироваться непосредственно над известной точкой с помощью лазерного отвеса. Ориентация может быть определена путем сканирования только 1 цели в следующем положении установки лазерного сканера. Эти лазерные сканеры также имеют двухосевой компенсатор, поэтому они выравниваются в определенных пределах. Это выравнивание накладывает третье ограничение на ориентацию сканирования.

Иногда верх вертикальной оси вращения сканера закрепляется специальный отражатель. Точное положение этого отражателя относительно центра лазерного луча может быть определено с помощью процедуры калибровки. Если это положение известно, отражатель можно измерить с помощью тахеометра, как это делается при установке замкнутого (или открытого) полигона для построения траверсной сети. Другим способом определения положения сканера является установка на сканер GPS-приемника.

Этот метод позволяет уменьшить количество размещаемых целей и, следовательно, избежать серьезных требований к конфигурации целей. Сканирование также не требует перекрытия. Учитывая все эти соображения, данный метод часто оказывается быстрее, чем использование косвенной регистрации.

Если требуется географическая привязка, измеренное положение отражателя может быть преобразовано в определенную известную систему координат с использованием общих методов геодезии.

3.5.3 Общий аспект регистрации и привязки к местности

В этом параграфе описаны некоторые советы по осторожности, которые следует соблюдать при регистрации наборов данных или даже при планировании этапа регистрации. Большинство этих утверждений взяты из публикации English Heritage [29].

- При выполнении регистрации убедитесь, что остатки процесса глобальной регистрации равны или лучше, чем геометрическая точность, требуемая конечным результатом.
- Если регистрация выполняется исключительно с использованием расчета резекции (косвенная), каждый скан должен содержать не менее 4 соответствующим образом распределенных XYZ контрольных точек/целей. Это переопределяет геометрические отношения между двумя наборами данных, поэтому для минимизации ошибок в регистрации мишеней можно использовать оптимизацию по методу наименьших квадратов.
- Всегда включайте остатки процесса регистрации и геометрическую точность оцененных параметров в отчет о съемке.
- Добавляйте иллюстративные фотографии/скриншоты нерегулярных особенностей в данных сканирования, вызванных трещинами или особенностями на объекте, которые могут быть неверно истолкованы как ошибки в процессе регистрации, и отмечайте их в отчете о съемке.
- Не ставьте искусственные мишени в местах, где они заслоняют важные детали объекта. Не делайте мишени слишком большими.
- При установке мишеней на поверхность объекта убедитесь, что клей не повредит структуру.
- Старайтесь избегать использования естественных точек мишеней, поскольку они менее точны, чем искусственные точки мишеней.
- Программное обеспечение для управления сканированием должно быть адаптировано к типу используемых мишеней.

Некоторые плоские светоотражающие мишени, к примеру, демонстрируют эффект ореола, вызванный множественными возвратами лазерной энергии в центр мишени. Соответствующее программное обеспечение может уменьшить скопление возвратов к центру цели, например, используя взвешивание интенсивности отдельных возвратов [11].

- При сканировании искусственных целей под очень острыми углами не следует использовать средства автоматической идентификации целей, поскольку они дают плохие результаты.

3.6 Обработка 3D облака точек

Обработка облака точек означает процесс преобразования необработанного зарегистрированного облака точек в конечный результат. Эти результаты могут быть представлены в самых разных форматах: очищенные данные облака точек, стандартные 2D-чертежи (например, планы, высоты, сечения), полностью 3D-текстурированные модели для анимационных роликов.

Часто компании, производящие сканеры, демонстрируют впечатляющие видеоролики превращения облаков точек в полностью текстурированные модели менее чем за одну секунду. Однако в реальности этот процесс все еще занимает много времени и в основном выполняется вручную. На рисунке ниже представлен обзор различных этапов процесса лазерного сканирования и степень их автоматизации.

В целом, обработку 3D облака точек можно разделить на две категории. Поставляемые товары могут быть извлечены прямо из облака точек без дополнительной обработки, или сначала создается 3D модель поверхности из облака точек и из этой модели поверхности извлекаются поставляемые товары. Выбор метода во многом зависит от требуемых результатов. Например, если требуется только ограниченное количество сечений, лучше извлекать их непосредственно из облака точек. Однако, если требуется большее количество сечений (+50), второй метод более эффективен, поскольку существуют автоматизированные инструменты для создания нескольких сечений из сеточной модели. Кроме того, модель поверхности добавляет больше ценности и понимания, чем просто необработанное зарегистрированное облако точек.

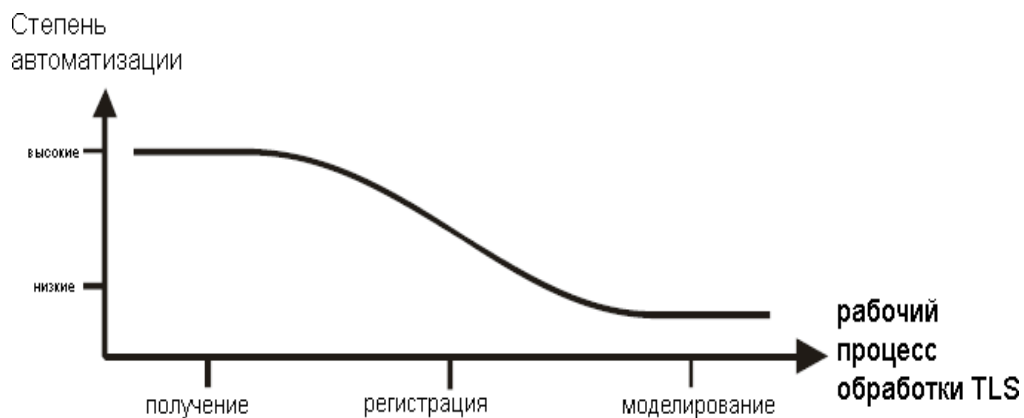


Рисунок 37 - Автоматизация в рабочем процессе наземного лазерного сканирования

3.6.1 Представления облака точек

Результатом сканирования является огромное количество точек в пространстве, каждая из которых имеет координаты x, y, z и, как правило, значение лазерного отражения. Некоторые сканеры даже предоставляют информацию о цвете в виде значений RGB.

Облако точек можно представить, нарисовав все эти точки на экране, но это производит очень хаотичное впечатление, и пользователю будет трудно распознать структуры из облака. Когда каждой точке присваивается значение отражательной способности или цвет, общая структура становится понятной.

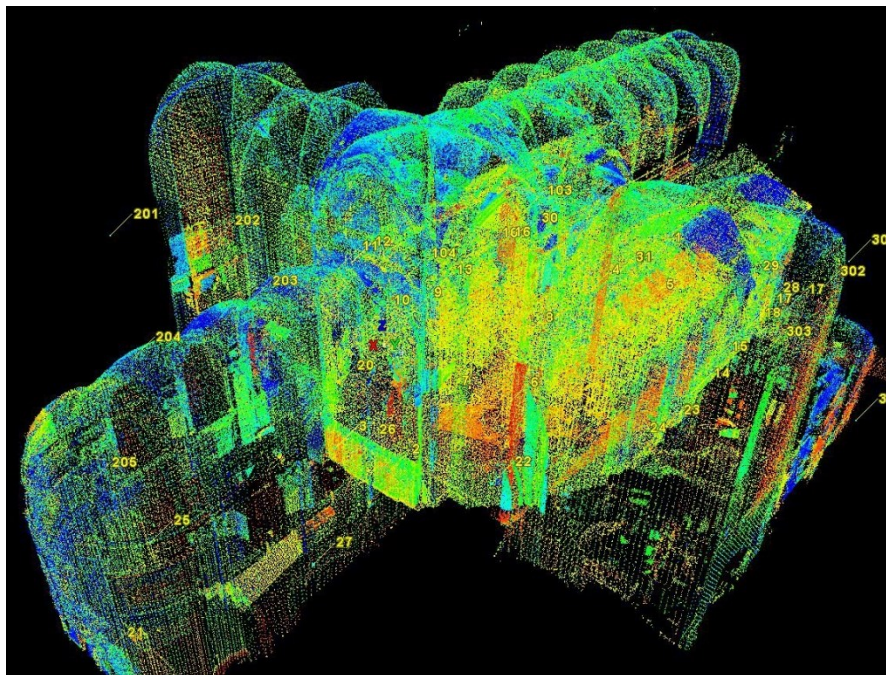


Рисунок 38 - Неорганизованное облако точек

Поскольку большинство лазерных сканеров сканируют сцену в столбцах и строках, один из способов представить облако точек очень простым способом - в виде карты глубины. Карта глубины - это матрицеподобная структура (2D), в которой каждый пиксель представляет расстояние 3D-точки до сканера в виде значения серого цвета. Поскольку этот тип представления включает в себя информацию о соседях, он очень полезен в алгоритмах обработки облака точек и известен как организованное облако точек.



Рисунок 39 - Карта глубины

С помощью сложных алгоритмов зацепления (триангуляции) соседние точки могут быть соединены для формирования поверхностей. Это обеспечивает более близкое к реальности представление, поскольку поверхностные структуры или сетки не прозрачны, поэтому точки, лежащие за другими, не видны. Вычисляя направления локальных нормалей поверхности, можно использовать искусственное затенение для выделения деталей поверхности.

Поскольку генерация сетки, особенно из неорганизованного облака точек, сложна и может занимать значительное время, предпринимались попытки найти альтернативные варианты быстрого создания грубого представления облака только для просмотра и анализа. В результате возникла идея лазерного разделения точек. Точечный метод генерирует сюрфели (небольшие элементы поверхности) для каждой точки в облаке из необработанных данных лазерного сканера. Каждый сюрфель представлен небольшой примитивной формой поверхности (круг, эллипс ...) в 3D, которая наследует свою нормаль, вычисленную от соседних точек. В результате достигается очень высокая скорость представления поверхности.

3.6.2 Улучшение данных

Фильтрация шумов

Первым шагом в процессе построения сетки является удаление зашумленных данных из облака точек. Если шум был внесен из-за ветра, плохого отражения поверхности и т.д. (см. главу 2.6), сетка будет содержать треугольники, соединяющие эти зашумленные точки с правильными точками. В результате сетка будет полна пиков. Поэтому важно удалить эти зашумленные точки на первом этапе.

Часто оператор может легко определить детали, которые отсканированы, но не требуются в конечном результате. Поэтому рекомендуется, чтобы этот оператор провел первый анализ облака точек и удалил все ненужные точки из набора данных вручную.

Автоматические алгоритмы, удаляющие зашумленные точки, в основном основаны на двух принципах. Первый принцип заключается в том, что точки, которые имеют мало или вообще не имеют других точек в своем непосредственном окружении, считаются выбросами. Вероятно, они возникают из-за людей или других препятствий, движущихся перед сканером во время сканирования, и не являются частью сканируемого объекта. Эти точки можно легко идентифицировать с помощью ограниченного числа настроек параметров и затем удалить из облака точек.

Другой принцип удаления шума заключается в небольшом перемещении точек для достижения оптимальной гладкости поверхности. Эти алгоритмы пытаются локально подогнать плоскости (свободной формы) к точкам в облаке точек. Если центральная точка лежит очень далеко от подогнанной плоскости, ее перемещают в сторону плоскости, чтобы обеспечить большую согласованность с соседними точками. Существуют и другие шумовые фильтры, некоторые из них специализированы в зависимости от типа сканера, другие устраняют систематические ошибки. Конечно, при удалении зашумленных точек необходимо соблюдать осторожность. Особенности могут быть потеряны при чрезмерном сглаживании набора данных или удалении слишком большого количества точек.

Повторная выборка

Как упоминалось ранее, при создании сетки количество треугольников более чем в два раза превышает количество точек. Сетчатая версия облака точек на основе фазы может легко измерять до 20 миллионов треугольников. С таким количеством треугольников становится трудно работать с использованием стандартного оборудования. В общем случае количество точек перед зацеплением необходимо сократить, и это сокращение может быть выполнено двумя способами.

Самый простой способ уменьшения количества точек - это удаление одной точки через каждые несколько других точек. Если основываться на их трехмерном пространственном положении, точки могут быть удалены с сохранением полного покрытия области. Однако этот метод может привести к удалению точек в областях, содержащих важные особенности, и, следовательно, к удалению ценной информации.

Другим способом удаления точек является анализ кривизны поверхности, чтобы определить, является ли часть поверхности гладкой или сильно искривленной. Эта техника повторной выборки облака точек работает разумно, сохраняя ценные точки в областях с высокой кривизной и удаляя точки в областях, которые могут быть легко представлены меньшим количеством точек. Используя эту технику, можно добиться надлежащего уменьшения размера исходного облака точек без потери ценных характеристик.

3.6.3 Прямое 2D-моделирование из облаков точек

Прямое 2D-моделирование из облаков точек - это предмет человеческой интерпретации. Большинство доступных программных пакетов в этой области являются плагинами для CAD-пакетов, таких как AutoCAD или MicroStation. Специальные интерфейсы позволяют пользователю загружать огромные облака точек в эти программы и обрабатывать их с помощью стандартных инструментов CAD. Типичным программным обеспечением для выполнения этих задач являются: Leica CloudWorx, Kubit Pointcloud, LFM CAD Link, ...).

Поперечные сечения, планы и высоты могут быть созданы путем взятия тонкого среза точек из облака точек и проецирования всех точек на плоскость. Затем пользователь должен вручную обвести или соединить точки, создавая линии, дуги и т.д. Пользователь делает интерпретацию углов и деталей, которые меньше, чем разрешение сканирования. Это точная и сложная задача, которая может занять много времени для выполнения одного сечения или плана. Человек, выполняющий эту задачу, должен иметь правильное представление о здании или сооружении или иметь в своем распоряжении фотоматериалы, чтобы сделать правильную интерпретацию.

В некоторых исследовательских центрах ученые создают алгоритмы, которые могут автоматизировать эти задачи. Некоторые из этих алгоритмов оказались полезными, однако для получения удовлетворительных результатов им необходимы определенные ограничения. Это означает, что они не могут быть использованы в общем виде и поэтому пока не реализованы в коммерчески доступном программном обеспечении.

Возвышения могут быть созданы двумя способами. При наличии цветовой информации, полученной с помощью фотографий, или интенсивности отражения лазерного луча, цветные точки могут быть ортогонально спроецированы на плоскость, создавая настоящую ортофотографию. Отслеживая эту ортофотографию, можно получить высоту. Важно отметить, что точность рельефа сильно зависит от разрешения сканирования.

Другой способ создания рельефа заключается в отслеживании важных граней (например, оконных проемов, дверных проемов и т.д.) в 3D облаке точек и последующем проецировании всех этих 3D объектов на плоскость. Этот метод требует хорошего геометрического понимания и способности быстро распознавать структуры в облаках точек.

Некоторые программные пакеты позволяют пользователю регистрировать внешние изображения в облаке точек и использовать их для моно-планирования. Это означает, что интерпретация выполняется на изображении, а информация о глубине собирается из облака точек. Проблема с этим типом программного обеспечения заключается в том, что результаты всегда должны быть перепроверены, так как трассировка края на изображении часто неправильно интерпретируется программным обеспечением из-за недостающих данных и поэтому не генерируется в правильном положении.

3.6.4 Прямое 3D-моделирование на основе облаков точек

Если форма 3D-объекта известна заранее и может быть описана геометрическими примитивами, его можно автоматически определить по облаку точек. При подгонке этих геометрических фигур к облаку точек алгоритм делает предположение, что это идеальная форма. Например, скан нефтехимического завода может быть легко преобразован в 3D-модель, исходя из того, что все трубы имеют круглое сечение, а соединительные элементы также имеют определенную форму. Большинство из этих приложений применяются в нефтехимической промышленности.

3.6.5 3D-моделирование сложных поверхностей

В конечном итоге, результатом процесса 3D-моделирования является модель поверхности с сеткой. Соединяя все точки в облаке точек маленькими треугольниками, создается модель поверхности или сетка. Эта сетка представляет собой интерполяцию точек в трех измерениях, создавая полное представление поверхности. Чтобы создать качественную сетку, необходимо выполнить ряд шагов:

- Очистка данных (подавление шума, удаление выбросов...)
- Повторная выборка (см. 3.6.2.2)
- Сетка/триангуляция
- Заполнение дыр (перекрытие, объединение...)
- Оптимизация сетки (децимация...)

Сетка/триангуляция

Существуют различные алгоритмы для создания сеток из облаков точек. Соединения между точками обычно строятся из треугольников или четырехугольников. Самыми популярными методами построения сеток из треугольников и четырехугольников являются методы, использующие критерий Делоне. В последние годы были разработаны более сложные алгоритмы построения сетки, такие как алгоритм поворота шара или алгоритм марширующих кубов, которые способны триангулировать огромные наборы данных с минимальными затратами памяти.

Монтаж с отверстием

В последние годы были разработаны более сложные алгоритмы зацепления, такие как алгоритм поворота шара или алгоритм марширующих кубов, которые способны триангулировать огромные наборы данных с низким потреблением памяти.

Оптимизация сетки

Хотя облако точек было уменьшено во время повторной выборки для создания меньшего количества треугольников в сетке, может потребоваться уменьшить количество треугольников в сетке на втором этапе, чтобы преодолеть возможности оборудования. Это называется децимацией сетки.

Другим способом оптимизации описания поверхности является ее аппроксимация с помощью математических поверхностей. Один из наиболее часто используемых типов поверхностей для этой задачи - NURBS (Non Uniform Rational Basis functions). NURBS - это математически точные представления поверхностей свободной формы, таких как кузова автомобилей, корпуса кораблей или даже человеческое лицо. Они имеют контрольные точки, которые направляют поверхность; однако эти контрольные точки не обязательно являются точками облака точек.

3.6.6 Косвенное 2D-моделирование на основе облаков точек

Косвенное 2D-моделирование означает создание 2D-чертежей на основе 3D-моделированных или сетчатых объектов. Этот метод полезен, когда необходимо сделать несколько поперечных сечений, например, одно сечение через каждый 1 сантиметр для создания контурной карты глубины.

Косвенное моделирование требует этапа 3D-моделирования, как описано в главе 3.6.5. После создания модели поверхности она может быть легко пересечена плоскостями для создания поперечных сечений. Интерполяция областей между измеренными точками выполняется автоматически на этапе построения сетки и не требует участия оператора.

3.6.7 Наложение текстур

Текстурная карта (т.е. информация о цвете или другая информация) наносится на поверхность фигуры или полигона. Для правильного размещения текстурной информации используются ультрафиолетовые карты (см. рис. 49). В отличие от x, y и z, которые являются координатами исходного 3D-объекта

в пространстве моделирования, "U" и "V" - координаты преобразованного объекта. Ультрафиолетовое отображение преобразует 3D-объект/сетку в плоское изображение, которое затем может быть использовано для наложения текстурной информации. Это преобразование сетки можно также описать как разворачивание или наложение 3D-формы на 2D-холст.

Когда модель создается в виде полигональной сетки с помощью 3D-моделлера, для каждой вершины сетки могут быть созданы UV-координаты. Один из способов - 3D-моделлер разворачивает треугольную сетку по швам, автоматически выкладывая треугольники на плоский лист. UV-карта может быть либо сгенерирована автоматически программным приложением, либо сделана вручную художником, либо сочетать оба способа. Обычно используются следующие карты: карты высот, карты нормалей, карты смещения, карты света, specular-карты и карты неровностей.

После создания UV-карты пользователь может закрасить/раскрасить эту UV-карту, а затем спроецировать ее на 3D-модель, что облегчает правильное раскрашивание 3D-модели.

Вместо использования UV-карт в некоторых пакетах 3D-программ есть возможность проецировать и запекать текстурную информацию на поверхность, обычно с использованием ортографических проекций, что упрощает процесс создания текстуры.

Проецирование предпочтительнее проекций из-за минимального растяжения текстуры. Обе техники можно использовать и смешивать в одной 3D-модели.

При лазерном сканировании для визуализации 3D-моделей часто требуется фотографическая информация высокого разрешения. Для точного отображения необходимо знать положение камер и внутренние настройки камеры (фокусное расстояние, искажения объектива...) по отношению к модели. Коммерческие программные пакеты предоставляют алгоритмы, которые позволяют пользователю вручную выбирать соответствующие точки между изображением и 3D-моделью для определения этих неизвестных параметров. При достаточном соответствии можно рассчитать положение и параметры камеры.

Для проецирования фотографий на 3D-модель существует в основном два различных алгоритма: текстурирование и драпировка текстуры. Драпировка текстуры может быть описана как помещение фотографии на кусок эластичного холста, а затем натягивание его на 3D-модель. Это означает, что области, которые не содержат много информации или вообще никакой информации на фотографии (например, очень наклонные поверхности), будут растянуты и, следовательно, текстурированы неправильно. Текстурирование решает эту проблему, сначала анализируя видимые части изображения, а затем проецируя только эти пиксели фотографии на 3D-модель.

Детализация текстурной карты зависит от разрешения, которое чаще всего определяется как сила двойки (т.е. 512*256, 1024*1024), что является оптимальным для графической памяти. Новое поколение графических карт лучше справляется с текстурами, которые не имеют силу два.

3.7 Контроль качества и доставка

Аспект качества съемки с использованием лазерных сканеров требует тщательного рассмотрения на протяжении всего процесса измерения и обработки. Каждый раз, когда сканер настраивается для сбора данных (до, во время и после), определенные элементы данных должны быть осмотрены и проверены на соответствие ожидаемым или прогнозируемым результатам. Наиболее технические факторы, которые могут повлиять на качество данных, были подробно описаны в разделе 2.6. В дополнение к этим факторам операторы сканера должны также проверять такие факторы, как достаточное покрытие территории, равномерное распределение точек с требуемым разрешением, эталонная съемка камерой с высоким разрешением, правильное получение отражающих мишеней сканера и получение дополнительных

контрольных размеров, которые будут очень полезны на дальнейших этапах обработки.

Качество начинается с полного понимания спецификации проекта. Это понимание позволяет правильно выбрать сканер, правильное разрешение сканирования, подходящий метод регистрации и т.д. Например, выбор сканера с недостаточным радиусом действия, недостаточное количество целей и позиций сканирования, недостаточное перекрытие (если вы решили регистрировать сканы с использованием перекрывающихся сканов), и, что самое важное, недостаточное разрешение скана, будут иметь прямое влияние на качество конечного продукта при создании данных из облака точек.

Адекватная документация на месте гарантирует достижение оптимального качества. Вспомогательные эскизы, контрольные фотографии, контрольные размеры будут использоваться на последующих этапах обработки.

В целом, целью должно быть достижение точности регистрации, в десять раз меньшей, чем точность требуемого конечного продукта. При этом следует помнить, что существует множество других элементов, которые могут влиять на точность; поэтому всегда лучше стремиться к наилучшим результатам регистрации.

Блок-схема на следующей странице (рис. 40) дает представление об обеспечении качества при лазерной сканирующей съемке.

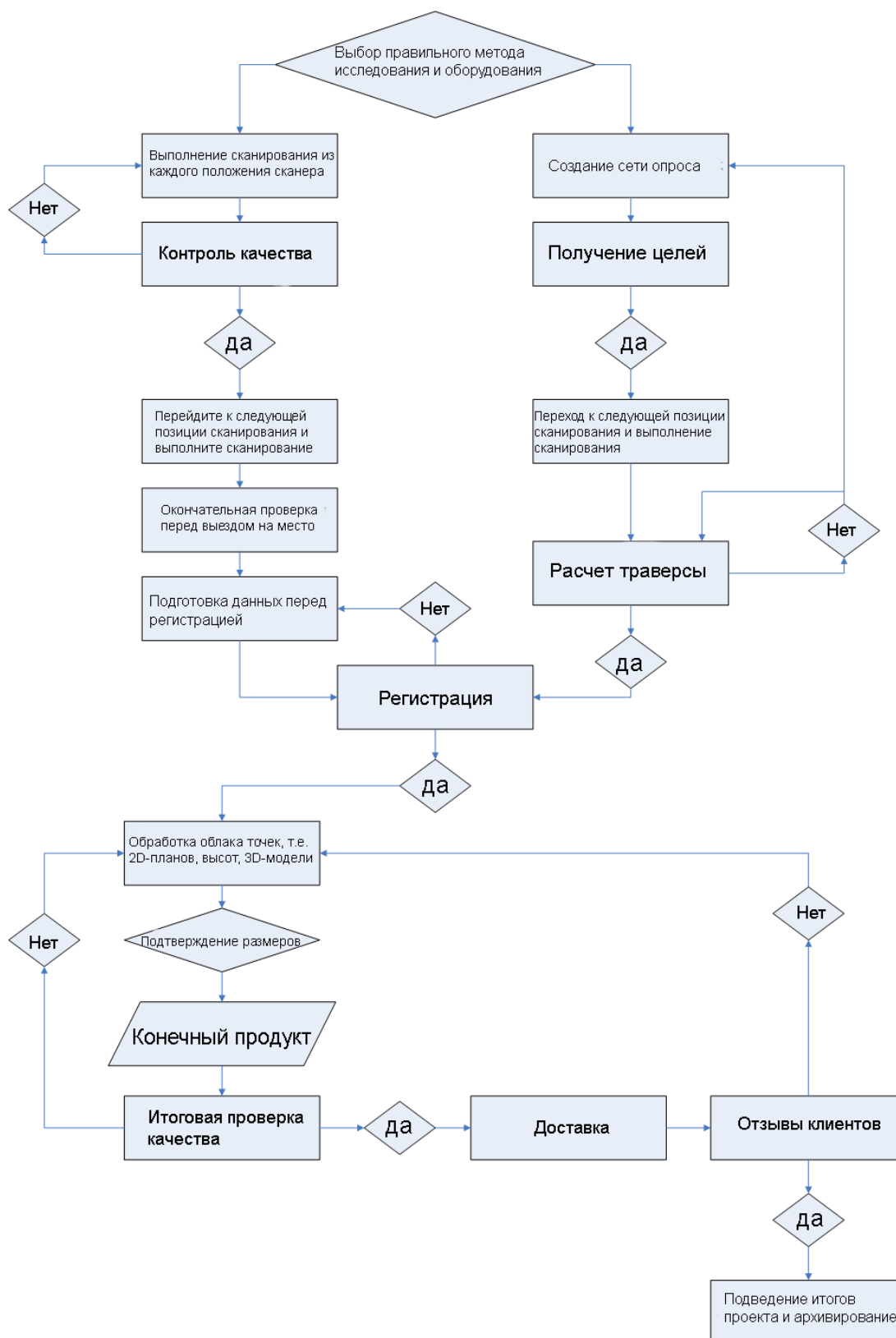


Рисунок 40 - Блок-схема контроля качества