

# Геоматика -1 наземное лазерное сканирование

## СОДЕРЖАНИЕ

В книге рассмотрены устройство, принцип действия и классификация наземных лазерных сканеров. Приведены источники погрешностей в результате наземного лазерного сканирования и даны практические рекомендации по их исключению.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение			
1.1 Что такое лазерное сканирование			
1.2 Статическое и динамическое лазерное сканирование			
1.3 Применение лазерного сканирования			
2. Принцип действия наземных лазерных сканеров			
2.1 Электромагнитный спектр и свет			
2.2 Лазеры			
2.3 Важные свойства лазерного излучения			
2.4 Лазерная безопасность			
2.5 Измерение с помощью света			
2.6 Метрологические аспекты: анализ ошибок			
2.7 Современное лазерное сканерное оборудование			
3. Лазерное сканирование на практике			
3.1 Планирование обследования			
3.2 Полевые работы			
3.3 Получение данных			
3.4 Подготовка данных			
3.5 Регистрация и геопривязка			
3.6 Обработка 3D-облака точек			
3.7 Контроль качества и доставка			

#### 1. Введение

Оценка риска — это процесс, при котором опасности идентифицируются, анализируются или оцениваются на предмет риска. связанных с этой опасностью, для определения соответствующих способов устранения или контроля опасности С практической точки зрения угроза, оценка риска — это тщательный осмотр рабочего места, здания или окружающей среды. идентифицировать эти элементы, ситуации, процессы. д., которые могут причинить вред, особенно людям. После идентификации проводится оценка того, насколько вероятен и серьезен риск, что помогает принять решение. какие меры должны быть приняты для предотвращения или ограничения причинения вреда.

Процесс оценки рисков можно обобщить следующим образом (рис. 1):

- Идентификация и оценка риска: определение и анализ потенциала, происхождения, характеристик и поведения опасности – например, частота возникновения/величина последствий
- Обработка потенциальных рисков:
  - Сокращение: планирование и реализация структурных вмешательств (например, плотин, дамб) или неструктурных мер, таких как законодательство о стихийных бедствиях.
  - Раннее предупреждение: предоставление своевременной и практической информации через определенные учреждения, которые позволяют лицам, подвергающимся опасности, принимать меры, чтобы избежать или уменьшить свой риск и подготовиться к эффективному реагированию.
  - Готовность к стихийным бедствиям и управление чрезвычайными ситуациями: действия и меры, принимаемые заблаговременно для обеспечения надлежащего реагирования на воздействие опасности, включая меры, связанные со своевременным и эффективным предупреждением, а также с планированием эвакуации и действий в чрезвычайных ситуациях.
  - Восстановление/реконструкция: решения и действия, предпринятые на этапе после стихийного бедствия с целью восстановления условий жизни пострадавшего населения.

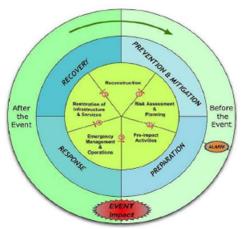


Рисунок 1 – Цикл управления рисками

Надлежащая оценка рисков или управление рисками требует актуальной информации, возможного быстрого реагирования, точных данных и возможности проверки данных на

предмет их изменения в течение определенного промежутка 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 конструкций с течением времени из-за внешних или внутренних сил
- Выявление возможных зон затопления путем анализа рельефа местности
- Моделирование оползней или землетрясений
- Оценка состояния и анализ безопасности дорог и мостов
- Документирование районов бедствия, когда бедствие уже произошло; сюда входят обрушения зданий, дефекты проезжей части, структурные разрушения, поврежденные транспортные средства; зоны столкновения, в том числе проезжие части, отгрузочные доки, стоянки и лестницы; остатки строительных пожаров; проверки пересечения с новыми конструкциями и базами данных исполнительного сканирования
- Запись места преступления (сравнение профилей повреждений, отсутствие искажения улик, учет окружающей среды, быстрое очистка места происшествия)
- Обследование районов с интенсивным движением без остановок и риска для съемочной группы
- Проведение дистанционных и точных замеров скальных поверхностей (опасность обвала камней)
- Моделирование цунами
- Картирование ГИС: местонахождение пострадавших людей и важных объектов инфраструктуры, таких как больницы или пожарные части.

#### 1.1 Что такое лазерное сканирование?

Лазерное сканирование описывает метод, при котором образец поверхности берется или сканируется с использованием лазерной технологии. Он анализирует реальный мир или объектную среду для сбора данных о его форме и, возможно, внешнем виде (например, цвете). Собранные данные затем можно использовать для построения цифровых двумерных чертежей или трехмерных моделей, полезных для различных приложений.

Преимущество лазерного сканирования в том, что оно позволяет регистрировать огромное количество точек с высокой точностью за относительно короткое время. Это фотография с информацией о глубине. Лазерные сканеры являются инструментами прямой видимости, поэтому для обеспечения полного охвата конструкции 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 удерживается в фиксированном положении во время сбора данных, это называется статическим лазерным сканированием. Преимуществами использования этого метода являются высокая точность и относительно высокая плотность точек. Все статическое лазерное сканирование можно рассматривать как

наземное лазерное сканирование; однако не все виды наземного лазерного сканирования можно отнести к категории статического лазерного сканирования.

В случаях динамического лазерного сканирования сканер устанавливается на мобильной платформе. Для этих 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 (бортовое лазерное сканирование), сканирование движущегося автомобиля или беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Эти заметки посвящены статическому лазерному сканированию.

#### 1.3 Применение лазерного сканирования

На ранних этапах лазерное сканирование применялось для ближнего действия и в основном использовалось в процессе автомобильного и промышленного проектирования для облегчения процесса автоматизированного проектирования (САПР). Это помогло в массовом производстве потребительских товаров.

Однако, поскольку технологии продолжают развиваться, используются и другие Сканеры потенциальные области. среднего диапазона были разработаны для нефтехимической промышленности. Из-за были сложности заводов, которые задокументированы только в виде 2D-чертежей, лазерное сканирование привело к полному 3D-управлению объектами.

Поскольку очевидные преимущества лазерного сканирования, такие как: бесконтактное измерение, высокая точность, большой радиус действия, быстрое получение данных и т. д., другие дисциплины, такие как культурное наследие, архитектура, градостроительство, криминалистика и индустрия развлечений, начинают неуклонно внедрять это. технология (см. рис. 2)

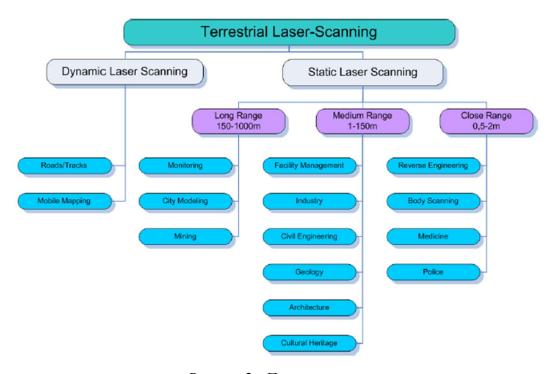


Рисунок 2 – Применение лазерного сканера

## 2. Принципы лазерного сканирования

#### 2.1 Электромагнитный спектр и свет

Электромагнитный спектр более знаком вам, чем можно подумать. Микроволновая печь, которую вы используете для разогрева пищи, и мобильные телефоны, которые вы используете, используют части электромагнитного спектра. Причина, по которой мы видим объекты, заключается в том, что они излучают, отражают или пропускают 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 пурпурного.

Каждый из этих цветов на самом деле соответствует разной длине волны света. Мы можем увидеть это, если пропустим белый свет через стеклянную призму — фиолетовый свет преломляется («преломляется») больше, чем красный, потому что у него более короткая длина волны, — и мы видим радугу цветов.

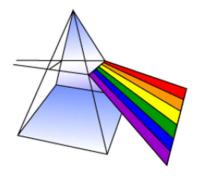


Рисунок 3. Призма, преобразующая белый свет в различные цвета.

Волны электромагнитного спектра различаются по размеру от очень длинных радиоволн (размером здания) до очень коротких гамма-лучей, меньших размера ядра атома.

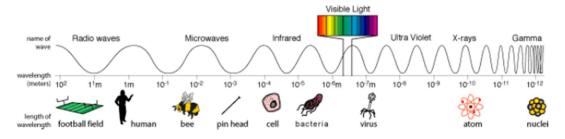


Рисунок 4 – Электромагнитный спектр

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

$$wavespeed\ (c) = frequency(f) \cdot wavelenght(\lambda)$$

$$energy(E) = h \cdot frequency(f) = \frac{h \cdot wavespeed(c)}{wavelenght(\lambda)}$$

где:

с — скорость света (299 792 458 м/с).

h – постоянная Планка (6,626069,10-34 Дж·с).

Итак, высокочастотные электромагнитные волны имеют короткие длины волн и большую энергию; и наоборот, низкочастотные волны имеют большую длину волны и низкую энергию.

## 2.2 Лазеры

Устройство, способное генерировать волну света, используя только очень узкую полосу спектра, называется лазером. Типичный лазер излучает узкий луч с малой расходимостью и четко определенной длиной волны (соответствующей определенному цвету, если лазер работает в видимом спектре). Это отличается от источника света, такого как лампа накаливания, которая излучает под большим телесным углом и в широком спектре длин волн. Эти свойства можно обобщить в термине когерентность.

Лазеры на самом деле похожи на транзисторы, они генерируют или усиливают свет, точно так же, как транзисторы генерируют и усиливают электронные сигналы на звуковых, радиоили микроволновых частотах. Слово «лазер» является аббревиатурой от «Усиление света за счет стимулированного излучения». Первый работающий лазер был продемонстрирован в мае 1960 года Теодором Мейманом в исследовательской лаборатории Хьюза.

Лазеры используются в повседневной жизни, особенно в оптических запоминающих устройствах, таких как проигрыватели компакт-дисков и DVD, в которых лазер сканирует поверхность диска для извлечения данных. Другими распространенными областями применения лазеров являются считыватели штрих-кодов и лазерные указки. В промышленности лазеры используются для резки стали и других металлов, а также для нанесения узоров, таких как буквы на компьютерных клавиатурах. Лазеры также используются в военных и медицинских целях.

#### 2.3. Важные свойства лазерного излучения

Лазерный свет — это просто свет, генерируемый лазерным устройством. Такой свет имеет некоторые совершенно особые свойства, которые отличают его от света другого происхождения:

- Лазерный свет генерируется в виде лазерного луча. Такой лазерный луч имеет высокую (иногда очень высокую) степень пространственной когерентности, поэтому распространяется преимущественно в четко определенном направлении с умеренной расходимостью луча. Термин «когерентность» означает, что электрический сигнал в разных местах поперек профиля луча колеблется с жестким фазовым соотношением. Эта когерентность является причиной того, что лазерный луч может распространяться на большие расстояния и может быть сфокусирован в очень маленькие точки.
- Лазерный свет также имеет высокую степень временной когерентности (в большинстве случаев), что эквивалентно большой длине когерентности. Большие длины когерентности подразумевают жесткое фазовое соотношение в относительно длительных интервалах

времени, которые соответствуют большим расстояниям распространения (часто многие километры).

- Сочетание большой временной когерентности с большим временем когерентности или длиной когерентности приводит к узкой полосе спектра (или ширине линии). Это означает, что видимые лазерные лучи имеют определенный чистый цвет, т.е. 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 диапазон) или 532 нм (зеленый лазер). Следует отметить, что большая длина когерентности вносит тенденцию к явлению лазерного спекла, т. е. к характерному зернистому рисунку, который можно наблюдать. Этот эффект можно заметить, например, когда лазерный луч попадает на металлическую поверхность.
- В большинстве случаев лазерный свет имеет линейную поляризацию. Это означает, что электрическое поле колеблется в определенном пространственном направлении.

В зависимости от области применения лазерный свет может обладать и другими замечательными свойствами:

- Лазерный свет может быть видимым, но большинство лазеров на самом деле излучают в других областях спектра, в частности в ближней инфракрасной области, которую человеческий глаз не воспринимает.
- Лазерный свет не всегда непрерывен, он может излучаться в виде коротких или ультракоротких импульсов. Как следствие, пиковая мощность может быть чрезвычайно высокой.

Благодаря своим свойствам когерентности лазерные лучи остаются в фокусе, когда проецируются на удаленную сцену. Еще одним фундаментальным свойством (лазерных) световых волн является скорость их распространения. Световые волны распространяются с конечной и постоянной скоростью в некоторой среде. Благодаря этим свойствам лазерный свет отлично подходит для измерения объектов. Как это делается, будет объяснено в следующих параграфах.

#### 2.3 Лазерная безопасность

Лазеры используются в самых разных областях, включая научные, военные, медицинские и коммерческие области; все они были разработаны с момента изобретения лазера в 1958 году. Когерентность, высокая монохроматика и способность достигать экстремальных мощностей - все это свойства, которые позволяют использовать эти специализированные приложения. Поэтому с лазерным излучением следует обращаться с особой осторожностью, и становится необходимым понимание типов лазеров.

Чтобы пользователи могли определить потенциальный риск, все лазеры и устройства, использующие лазеры, помечены классификацией в зависимости от длины волны и мощности энергии, которую излучает лазер. Европейский стандарт [3] предоставляет информацию о классах лазеров и мерах предосторожности. Он выделяет семь классов лазеров:

• Лазеры класса 1 безопасны при разумно предсказуемых условиях эксплуатации, включая использование оптических инструментов для наблюдения внутри луча.

- Лазеры класса 1М безопасны при разумно предсказуемых условиях эксплуатации, но могут быть опасны, если в луче используется оптика.
- Лазеры класса 2 обычно вызывают мигательный рефлекс, защищающий глаз; ожидается, что эта реакция обеспечит адекватную защиту в разумно предсказуемых условиях, включая использование оптических приборов для наблюдения внутри луча.
- Лазеры класса 2М обычно вызывают рефлекс моргания, который защищает глаза, ожидается, что эта реакция обеспечит адекватную защиту в разумно предсказуемых условиях. Однако просмотр вывода может быть более опасным, если пользователь использует оптику внутри луча.
- Лазеры класса 3R потенциально опасны при прямом наблюдении за лучом, хотя риск ниже, чем для лазеров класса 3B.
- Лазеры класса 3В обычно опасны при прямом попадании внутрь луча, хотя просмотр диффузных отражений обычно безопасен. Лазеры этого класса, как правило, не подходят для съемки.
- Лазеры класса 4 могут вызвать повреждение глаз или кожи при прямом наблюдении. Лазеры этого класса также способны создавать опасные отражения. Лазеры этого класса не подходят для съемки.

Пользователи систем лазерного сканирования всегда должны знать класс своего инструмента. В частности, пользователь должен убедиться, что используется правильная система классификации. (Дополнительную информацию о лазерной безопасности см. в стандарте IEC [3]).

Особые меры предосторожности и процедуры изложены в стандарте IEC для лазерных изделий класса 1M, класса 2M и класса 3R, используемых при съемке, выравнивании и нивелировании. Эти меры предосторожности, относящиеся к лазерному сканированию:

- К установке, настройке и эксплуатации лазерного оборудования должны привлекаться только квалифицированные и обученные лица.
- Места, где используются эти лазеры, должны быть снабжены соответствующим предупреждающим знаком о лазерах.
- Следует принять меры предосторожности, чтобы люди не смотрели в луч (длительный просмотр внутри луча может быть опасен). Прямое наблюдение луча через оптические приборы (теодолиты и т. д.) также может быть опасным.
- Следует принять меры предосторожности, чтобы лазерный луч не был непреднамеренно направлен на зеркальные (зеркальные) поверхности.
- Если лазер не используется, его следует хранить в месте, недоступном для посторонних лиц.
- В потенциально взрывоопасных средах (например, нефтехимические заводы, горнодобывающая промышленность) следует использовать специальное «взрывозащищенное» лазерное оборудование. Важными свойствами взрывозащищенного оборудования являются: ограничение пиковой мощности лазера, отсутствие искрообразования, ограничение максимальной температуры оборудования.

#### 2.4 Измерение с помощью света

Из-за недавних разработок в области компьютерного зрения и сенсорных технологий свет использовался несколькими способами для измерения объектов. Эти методы измерения можно разделить на две категории: активные и пассивные методы.

Пассивные сканеры сами не излучают никакого излучения, а вместо этого полагаются на обнаружение отраженного окружающего излучения. Большинство сканеров этого типа обнаруживают видимый свет, потому что это легко доступное окружающее излучение. Можно использовать и другие типы излучения, например инфракрасное. Пассивные методы могут быть очень дешевыми, потому что в большинстве случаев они не требуют специального оборудования, кроме цифровой камеры. Проблема с этими методами заключается в том, что они основаны на поиске соответствий между 2D-изображениями, которые не всегда имеют уникальные решения. Например, повторяющиеся шаблоны имеют тенденцию «обманывать» метод измерения. Точность этих методов в основном зависит от разрешения системы визуализации и плотности идентифицируемых признаков на изображении.

В этих заметках мы сосредоточимся на методах активных измерений. Активные сканеры излучают какое-то контролируемое излучение и обнаруживают его отражение, чтобы исследовать объект или окружающую среду. Возможные типы используемого излучения включают свет, ультразвук или рентгеновское излучение. Поскольку эти активные методы измерения требуют лазерного передатчика и приемника, они механически более сложны, чем пассивные методы. Основными преимуществами этих систем являются:

- Им не требуется окружающее освещение, поскольку они генерируют собственное излучение;
- Они обеспечивают высокоплотные измерения очень автоматизированным способом;
- Их можно использовать на безликих поверхностях;
- Они имеют относительно быстрое время сбора данных (1000 500 000 точек/сек).

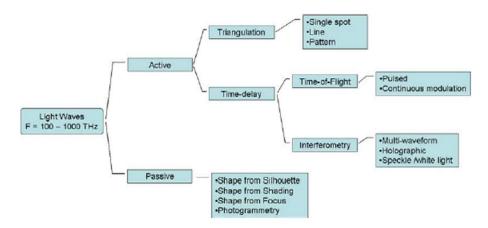


Рисунок 5 – Классификация методов измерения с использованием света

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

Существует ряд активных сканеров, отличающихся тем, как сканер принимает и/или анализирует сигнал отраженного излучения. В следующих главах эти различные типы активных сканеров описаны более подробно.

#### 2.5.1 Измерение на основе триангуляции

Треугольники являются основой многих методов измерения. Они уже использовались для базовых геодезических измерений в Древней Греции и до сих пор используются в современных лазерных 3D-камерах. Математическая основа треугольника (тригонометрия), которая является основой этих методов измерения, основанных на триангуляции, принадлежит греческому философу Фалесу (6 век до н.э.).

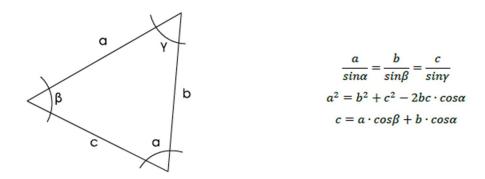


Рисунок 6 – Принцип триангуляции

Триангуляционный лазерный сканер использует тот же принцип для исследования окружающей среды. Он освещает объект лазерным лучом и использует камеру для определения местоположения проекции лазера на объект. Лазерный излучатель и камера устанавливаются под постоянным углом, создавая треугольник между ними и проекцией лазера на объект, отсюда и название триангуляция. Из-за такой конфигурации лазерная проекция меняется в поле зрения камеры в зависимости от расстояния до камеры.

Анализ рисунка 7 показывает, что на стороне треугольника (D) известно расстояние между камерой и лазерным излучателем. Также известен угол лазерного излучателя (α). Угол камеры (β) можно определить, посмотрев на расположение лазерного луча в поле зрения камеры. Эти три элемента информации полностью определяют форму и размер треугольника и обеспечивают точную глубину расположения измеряемого объекта.

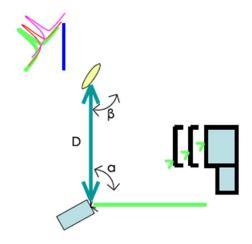


Рисунок 7 – Принцип триангуляционного лазерного сканирования

Можно показать, что чем шире базовая линия (D), тем меньше ошибки в координатах пикселей влияют на оценку местоположения по глубине. Однако базовую линию нельзя сделать очень большой, потому что тогда лазерный проектор и камера будут иметь уменьшенное перекрывающееся поле зрения (FOV), и лазерное пятно может вообще не попасть в изображение камеры.

Таким образом, возможные способы уменьшения неопределенности в направлении глубины:

- Уменьшение расстояния объекта до сканера → усиление эффекта тени
- Увеличение базы триангуляции (D) → также увеличивает эффект тени
- Увеличение фокусного расстояния объектива → уменьшает поле зрения
- Уменьшение погрешности измерения больше пикселей в камере

В большинстве случаев используется лазерная линия вместо одной лазерной точки, которая проводится по объекту для получения всего объекта в 3D. Это означает, что угол лазерного излучателя также изменяется при движении лазера по объекту.

Из-за физических ограничений использования более широкой базовой линии и ограниченного поля зрения камеры триангуляционные сканеры используются в приложениях, обычно требующих рабочего диапазона менее 10 метров. По сравнению со сканерами среднего и дальнего радиуса действия, основанными на принципах временной задержки (см. главу 2.5.2), триангуляционные сканеры обладают очень высокой точностью порядка микронов.

На практике метод активной триангуляции был изобретен для решения пресловутой проблемы соответствия, встречающейся в пассивных методах измерения. Проблема соответствия может быть сформулирована следующим образом: даны два изображения I1 и I2 сцены, снятые с двух разных точек зрения, относительная ориентация камер и пара совпадающих точек между этими изображениями; затем мы можем вычислить соответствующую трехмерную точку, используя принцип триангуляции. Таким образом, задача о соответствии состоит в поиске точек соответствия между различными изображениями. Метод активной триангуляции использует лазерный свет для решения этой проблемы, помечая 3D-точку на объекте цветом лазерного луча, чтобы ее можно было легко обнаружить на изображении.

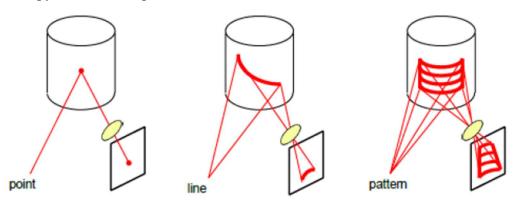


Рисунок 8 – Различные методы проецирования, используемые в триангуляционных сканерах

Чтобы избежать использования механических приспособлений, были введены некоторые новаторские модификации. Вместо того, чтобы перемещать/вращать лазерный излучатель,

чтобы покрыть весь объект, можно проецировать узоры из точек или линий, которые покрывают весь объект сразу. Используются различные шаблоны, начиная от обычных линейных шаблонов и заканчивая пространственно закодированными шаблонами, которые модулируют свою частоту или фазу во времени для обеспечения большей точности. Обратите внимание, что эти пространственно закодированные шаблоны требуют сканирования статического объекта.

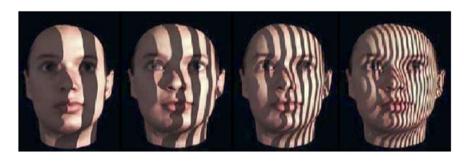


Рисунок 9 – Проекция регулярного шаблона

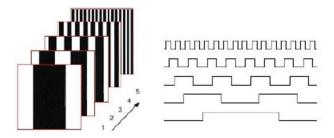


Рисунок 10 – Двоично-кодированная последовательность, модулированная по фазе во времени, также называемая интерференционной проекцией

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

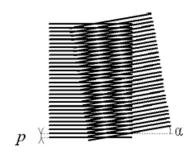


Рисунок 11 - Муаровый узор, образованный двумя наборами параллельных линий, один из которых наклонен под углом 5  $^{\circ}$  к другому.

В качестве заключительного замечания по сканерам на основе триангуляции отметим, что основной проблемой при использовании систем проекции с кодированной линией является уникальное разделение различных направлений проецирования на объекты, которые имеют внезапные скачки глубины и большие различия текстур на их поверхности.

#### 2.5.2 Измерение на основе времени

Сканеры на основе времени — это активные сканеры, которые измеряют временной интервал между двумя событиями. В общем, у нас есть два принципа сканирования на основе времени: сканеры на основе импульсов (Time-of-Flight) и сканеры на основе фаз.

Импульсные (времяпролетные) сканеры (некогерентное обнаружение)

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

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

Где с = скорость света в воздухе

t = время между отправкой и получением сигнала

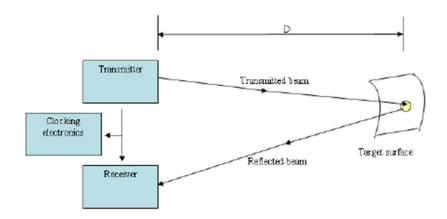


Рисунок 12 – Принцип времяпролетного лазерного сканера

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

Импульсные времяпролетные сканеры не используют непрерывные лазерные лучи, а используют лазерные импульсы. Они сканируют все свое поле зрения по одной точке за раз, меняя направление дальномера. Изменение направления взгляда лазерного дальномера осуществляется отклоняющим устройством (см. п. 2.5.3). Типичные импульсные лазерные 3D-сканеры с временем пролета могут измерять до 2000~50000 точек каждую секунду.

Обратите внимание, что для однозначного измерения измеренное время (t) должно быть больше ширины импульса  $T_{\rm pulse}$ . Таким образом



$$d > \frac{1}{2}c \cdot Tpulse$$

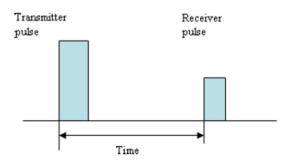


Рисунок 13 – Измерение лазерного импульса

Чтобы лучше понять эти уравнения, можно использовать числа. Установка Tpulse на 10 пс означает, что максимальная точность, которая может быть достигнута, будет d=1,5 мм. Большинство коммерческих систем среднего и дальнего радиуса действия обеспечивают точность от 6 до 10 мм. Поскольку точность зависит от часового механизма, погрешность времяпролетного сканера почти не зависит от самого расстояния (за исключением лазерного следа, см. главу 2.6.1).

Важно отметить, что метод определения времени для измерения отраженного импульса зависит от желаемого временного разрешения, скорости счета и требуемого динамического диапазона импульса. Обычно используемые принципы в конструкции дискриминатора включают синхронизацию по переднему фронту (постоянная амплитуда), синхронизацию по пересечению нуля (дифференцирование), синхронизацию по первому моменту (интегрирование) и постоянную дробную синхронизацию (поиск момента в импульсе, когда его высота имеет постоянное отношение по амплитуде импульса).

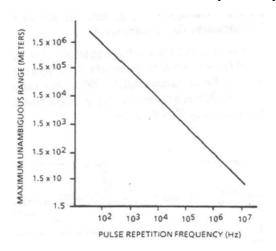


Рисунок 14 — Максимальная дальность однозначного определения в зависимости от частоты повторения импульсов

В импульсной времяпролетной системе максимальная частота повторения импульсов определяется тем, что передатчик не может послать следующий импульс, пока не будет получено эхо от предыдущего [7]. Цель этого ограничения состоит в том, чтобы избежать путаницы в импульсах, поступающих на счетчик временных интервалов, и называется

максимальным однозначным диапазоном. Максимальная однозначная дальность зависит от длительности импульса и его частоты.

На точность системы импульсной дальнометрии влияют три основных фактора [7]:

- Возможность выбора одного и того же относительного положения на переданном и принятом импульсе для измерения временного интервала. Это ограничивается шумом, временным дрожанием, силой сигнала и чувствительностью порогового детектора, а также короткостью и воспроизводимостью импульса передатчика.
- Точность, с которой известны фиксированные временные задержки в системе.
- Точность приборов измерения временных интервалов.

Преимуществом использования импульсов для лазерной локации является высокая концентрация передаваемой лазерной мощности. Такая мощность позволяет достичь требуемого SNR (отношение сигнал/шум), необходимого для высокоточных измерений на больших дальностях (до нескольких сотен метров). Недостатком является проблема определения точного времени прихода обратно рассеянного лазерного импульса из-за изменчивости оптического порога и атмосферного затухания.

#### На основе фазы

Другой принцип измерения, основанный на времени, позволяет избежать использования высокоточных часов за счет модуляции мощности лазерного луча. Излучаемый (некогерентный) свет модулируется по амплитуде и направляется на поверхность. Рассеянное отражение собирается, и схема измеряет разность фаз между отправленным и принятым сигналами, следовательно, временную задержку.

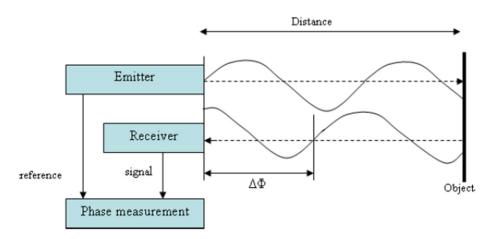


Рисунок 15 – Принцип измерения по фазе

Типичные фазовые сканеры модулируют свой сигнал с помощью синусоидальной модуляции, амплитудной (AM) или частотной (ЧМ) модуляции, псевдошумовой или поляризационной модуляции. В случае синусоидального модулированного сигнала отраженный свет демодулируется с помощью четырех точек дискретизации, которые запускаются излучаемой волной. Из четырех измерений  $c(\tau 0)$ ,  $c(\tau 1)$ ,  $c(\tau 2)$  и  $c(\tau 3)$  можно вычислить фазовый сдвиг  $\Delta\Phi$ , смещение B и амплитуду A:

$$B = \frac{c(\tau 0) + c(\tau 1) + c(\tau 2) + c(\tau 3)}{4}$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau 0) - c(\tau 2))^2 + (c(\tau 1) - c(\tau 3))^2}}{2}$$

$$\Delta \Phi = \arctan(c(\tau 0) - c(\tau 2))$$

Эта разность фаз может быть связана с временной задержкой, аналогичной той, которая измеряется в импульсных сканерах. Соотношение между разностью фаз ( $\Delta\Phi$ ), частотой модуляции (fmodulated) и временной задержкой (t):

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

Тогда, согласно уравнению измерения расстояния времяпролетного сканера, расстояние до цели определяется выражением

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

Снова числа могут быть вставлены, чтобы получить лучшее представление об этих объектах. При частоте 10 МГц и разрешении по фазе 0,01 градуса (не слишком сложно со стандартной электроникой) мы получаем разрешение по z около 0,5 мм.

Сканеры с непрерывной модуляцией луча также имеют максимальную однозначную дальность действия, аналогичную импульсным времяпролетным системам. Для этих систем диапазон ограничен тем, что вызывает фазовую задержку синусоиды на один полный цикл. Уравнение для максимальной однозначной дальности в системе с непрерывным сигналом имеет вид:

$$z_{amb} = \frac{c}{2 \cdot f_{modulated}}$$

В приведенном выше примере интервал составляет около 15 м (частота 10 МГц). Неопределенность измерения дальности пропорциональна Zamb и обратно пропорциональна отношению сигнал/шум (SNR). Чтобы обойти неудобство интервала неоднозначности диапазона, можно использовать многочастотные сигналы, в которых цель локализована на низкой частоте (длинная длина волны), а затем точное измерение выполняется на высокой частоте. В последнем поколении фазовых сканеров

Накладываются две или даже три волны с разными длинами волн. Самая длиная 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 времяпролетные сканеры.

Как правило, точность фазового сканера ограничивается:

- Частота сигнала или модуляции.
- Точность контура измерения фазы Зависит от уровня сигнала, шума, ...
- Стабильность генератора модуляции.

- Турбулентность воздуха, в котором производится измерение.
- Изменения показателя преломления воздуха.

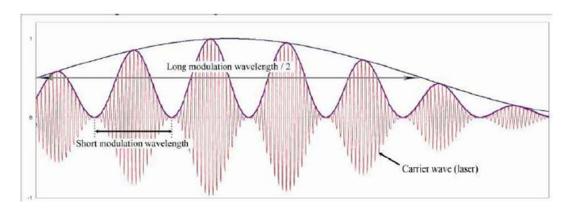


Рисунок 16 — Схематическое изображение двух длин волн модуляции и несущей волны для фазовой лазерной локации

#### Интерферометрия (когерентная)

Интерферометрия означает использование интерференции различных световых волн для записи 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 когда были изобретены лазеры, эти ограничения удалось преодолеть. Лазеры позволили интерферометрии превратиться в быстрый, высокоточный и универсальный метод измерения больших расстояний.

Интерферометрическое измерение расстояния может быть очень точным. Он предлагает более высокую степень точности, чем методы импульсной времяпролетной телеметрии или телеметрии с модуляцией луча. Однако лучше всего он подходит для измерений в контролируемой атмосфере (например, в помещении) на расстояниях не более нескольких десятков метров.

В интерферометрическом лазерном сканере лазерный луч разделяется с помощью светоделителя, который отражает половину луча в одном направлении (контрольное плечо) и пропускает другую половину (измерительное плечо). Обе части луча проходят по разным путям, и когда лучи объединяются вместе, образуются интерференционные полосы. Могут быть обнаружены очень небольшие смещения (порядка долей длины волны) (с помощью обнаружения когерентности), а также могут быть измерены большие расстояния с низкой погрешностью измерения (путем подсчета длин волн). На этом принципе построено много систем, например многоволновая, голография, спекл-интерферометрия. Эти системы имеют очень высокую точность, но и очень дороги.

#### 2.5.3 Методы отклонения луча для систем временных измерений

Чтобы иметь возможность измерять несколько точек с одной и той же точки зрения сканера, лазерный луч должен быть отклонен. Вместо перемещения самого лазера используется блок отклонения. В большинстве отклоняющих устройств используется зеркало, потому что они намного легче и поэтому могут вращаться намного быстрее и с большей точностью. Существует ряд 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 лазеру двигаться вдоль линии. Комбинация двух зеркал позволяет отклонять луч в двух направлениях (см. рис. 20а). Чтобы увеличить скорость отклоняющего устройства и упростить поворот зеркала, а затем его обратно, исследователи придумали вращающуюся оптическую отражающую призму (см. рис. 20b). Этот принцип требует только одного направления вращения и, следовательно, быстрее. Недавно было введено использование оптоволоконных коммутаторов, чтобы сделать системы более гибкими. Эти системы отклоняют лазерный луч в круг оптических волокон с помощью вращающегося зеркала (см. рис. 20в). Затем оптические волокна передают луч в любом необходимом направлении. Преимущества этой системы:

- Частота импульсов лазера не связана с углом обзора
- Возможно иметь очень плотный и регулярный шаблон сканирования
- После заводской настройки калибровка не требуется.
- Возможна передняя и боковая установка лазера

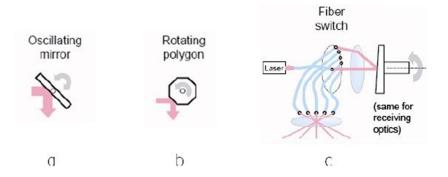


Рисунок 18 – Способы отклонения балки

#### 2.6 Метрологические аспекты: анализ ошибок

Компании-производители лазерных сканеров публикуют данные о точности своих лазерных сканеров, чтобы проиллюстрировать преимущества своего конкретного продукта. Однако опыт показывает, что иногда их не следует принимать за чистую монету и что точность приборов, выпускаемых ограниченными сериями, варьируется от прибора к прибору и зависит от индивидуальной калибровки и осторожности при использовании. инструмента.

Каждое облако точек, созданное лазерным сканером, содержит значительное количество точек, которые показывают грубые ошибки. Если поставляемый продукт представляет собой облако точек, точность съемки не может быть гарантирована в той же степени, что и точность съемки с помощью обычных приборов. Многие исследователи уже опубликовали работы по проверке точности с помощью лазерных сканеров (например, [11-15]). Компания іЗтаіпг, входящая в состав Университета прикладных наук в Майнце, и Института геодезии и фотограмметрии Швейцарского федерального технологического института в Цюрихе [16] провели тщательную работу по тестированию точности лазерного сканера. Для

возможности систематического описания источников ошибок при лазерном сканировании их делят на четыре категории: инструментальные, объектные, экологические и методологические ошибки.

#### 2.6.1 Инструментальные ошибки

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

#### Распространение лазерного луча

Расходимость луча — это расширение лазерного луча с пройденным расстоянием. Расхождение луча оказывает сильное влияние на разрешение облаков, а также на погрешность положения измеряемой точки. Расходимость луча можно выразить следующим уравнением:

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

рw = диапазон относительно положения перетяжки луча

w = радиус луча

w0 = минимальный радиус луча (в начальной точке) = перетяжка луча

Предполагается, что лазерное отражение имеет гауссову форму. Для больших расстояний расходимость приблизительно линейна, а диаметр луча выражается как положение, которое заключает в себе 86% общей мощности луча в рамках гауссовского распределения освещенности.



Рисунок 19 – Идеальное отражение, частичное освещение, частичная окклюзия

На практике эта расходимость луча влияет на угловое положение измеряемой точки. Видимое место наблюдения находится вдоль осевой линии испускаемого луча. Однако фактическое местоположение точки находится где-то в спроецированном контуре.

Согласно экспериментальным данным, погрешность луча приблизительно равна одной четверти диаметра лазерного луча.

#### Проблема смешанного края

Одним из наиболее важных следствий расходимости пучка является проблема смешанных краев. Когда лазерный луч попадает на край объекта, луч разделяется на две части. Одна часть луча отражается первая часть края прыжка, а другая часть движется дальше, чтобы удариться о другую поверхность. Результатом этого является то, что информация от одного лазерного импульса, отправленного обратно в приемник, поступает от двух разные места в пространстве. Координаты такой точки относительно положения сканера будут рассчитываться на основе среднего значения обоих возвращенных сигналов, и поэтому точка будет помещена в неправильное место.

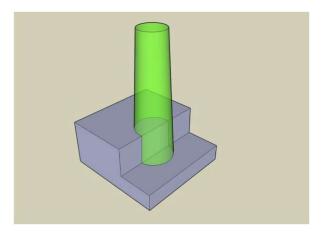


Рисунок 20 – Смешанный краевой эффект

При использовании сканирования объекта с высоким разрешением вероятность того, что луч попадет на край, увеличивается, и полученные данные будут показывать шум сразу за краями объекта. Сканеры с меньшей шириной луча помогают решить эту проблему, но ограничение дальности остается, поскольку ширина луча увеличивается с расстоянием.

#### Неопределенность диапазона

Неопределенность дальности может быть выражена как функция ряда параметров в зависимости от типа лазерного сканера и принципа его работы.

Для триангуляционного сканера неопределенность диапазона может быть выражена следующим образом:

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

Где:

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

D — базовая линия триангуляции,

δр — погрешность положения лазера — зависит от типа датчика лазерного пятна, алгоритма пикового детектора, отношения сигнал/шум и формы лазерного пятна изображения.

Z - расстояние до поверхности

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

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

Где

 $T_t$  – время нарастания импульса.

SNR — это отношение сигнал/шум.

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

Как уже объяснялось, сканеры с непрерывной волной

Сравнение неопределенности дальности между различными типами лазерных сканеров можно проиллюстрировать на графике, как показано, чтобы избежать необходимости в высокоскоростных механизмах синхронизации путем модуляции лазерного сигнала. Неопределенность диапазона в амплитудно-модулированном лазерном сканере зависит только от модулированной длины волны и отношения сигнал-шум и может быть описана как:

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

#### Угловая неопределенность

Большинство лазерных сканеров используют вращающиеся зеркала для направления лазерного сигнала в определенном направлении. Небольшая разница углов может вызвать значительную ошибку координат при увеличении расстояния от сканера. Угловая точность зависит от погрешности позиционирования зеркал и точности устройства измерения угла. Поскольку положение отдельных точек трудно проверить, известно мало исследований по этой проблеме. Как описано Boehler et al. [21], ошибки могут быть обнаружены путем измерения коротких горизонтальных и вертикальных расстояний между объектами (например, сферами), которые находятся на одинаковом расстоянии от сканера, и сравнения их с измерениями, полученными более точными методами съемки.

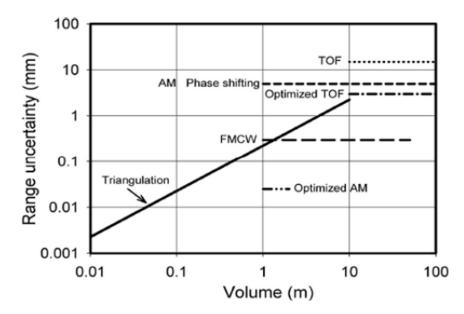


Рисунок 21 – Неопределенность диапазона для различных принципов работы лазерного сканера

#### Ошибки осей в TLS

При разработке процедур калибровки лазерного сканера необходима геометрическая модель сканера. Таким образом, мы определяем следующие оси:

- Вертикальная ось: это вертикальная ось, которая позволяет дальномеру перемещать лазерный луч по горизонтали. В зависимости от типа сканера, панорамный или камерасканер, это ось вращения сканирующей головки или ось, ортогональная 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.

Из-за производственных допусков эти 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. Поверхностное отражение монохроматического света обычно показывает отраженные лучи во многих направлениях. Этот тип изотропного (диффузного) отражения (рис. 24) в общем виде можно описать законом косинусов Ламберта:

$$I_{reflected}(\lambda) = I_i(\lambda).k_d(\lambda).\cos(\theta)$$

 $I_{i}\left(\lambda\right)$  интенсивность падающего света в зависимости от длины волны (цвета) (поглощается при движении по воздуху)

 $kd(\lambda)$  коэффициент диффузного отражения, который также зависит от длины волны.

 $\theta$  угол между падающим светом и вектором нормали к поверхности.

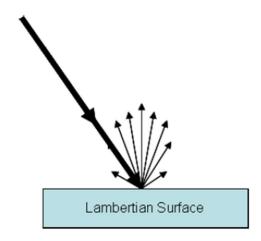


Рисунок 22 – Отражение ламбертовой поверхности

Эта формула показывает нам, что на лазерный луч влияет поглощение сигнала, проходящего через воздух, отражение измеряемого материала и угол падения между лазерным лучом и измеряемой поверхностью. Это означает, что для очень темных (черных) поверхностей, поглощающих большую часть видимого спектра, отраженный сигнал будет очень слабым, поэтому точность наведения будет снижаться из-за шума. Поверхности с высоким коэффициентом отражения (например, яркие поверхности) обеспечивают более надежные и точные измерения дальности. Однако, если отражательная способность объекта слишком высока (металлическая поверхность, световозвращающая лента...), лазерный луч полностью отклоняется в направлении зеркального отражения и попадает на другую поверхность или распространяется на открытое пространство. Это отклонение приводит к тому, что измеряемая точка является не точкой, на которую указывает лазер, а другой точкой или вообще не является точкой. Этот тип шума называется спекл-шумом.

Запись поверхностей разной отражательной способности также приводит к систематическим ошибкам по дальности, иногда в несколько раз превышающим стандартное отклонение однократного измерения дальности.

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

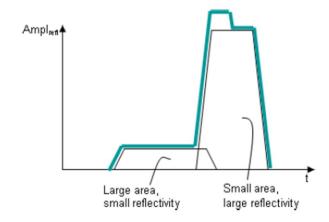


Рисунок 23 – Отклик сигнала при сканировании поверхностей разной отражательной способности

Помимо эффекта отражения, некоторые материалы имеют полупрозрачное покрытие, которое позволяет лазерному лучу преломляться и отражаться в самом материале (например, в дереве, мраморе, стиропоре). Эти эффекты приводят к добавлению константы к измерениям расстояния, что необходимо учитывать при расчетах.

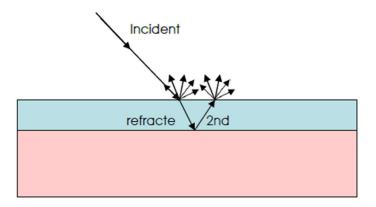


Рисунок 24 – Эффекты преломления в неоднородных полупрозрачных материалах

## 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, в результате чего эта сторона расширяется, медленно искажая данные сканера.

Важна не только температура оборудования, но и температура сканируемой поверхности. При сканировании горячей цели, т.е. в промышленных условиях фоновое излучение, вызванное горячей поверхностью, снижает отношение сигнал/шум и, следовательно, точность измерения дальности.

#### Атмосфера

Лазерные сканеры будут работать должным образом только 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 погрешности возникают в основном из-за атмосферных изменений температуры, давления и влажности, которые влияют на показатель преломления и изменяют длину волны электромагнитной энергии. Это означает, что скорость лазерного излучения сильно зависит от плотности воздуха.

В большинстве программ для лазерного сканирования предусмотрена коррекция этой рефракции путем установки параметра рефракции. Как правило, сканеры настраиваются с использованием стандартного параметра атмосферы ISO (15°C, 1013,25 гПа). При работе в атмосферных условиях, отличных от стандартной атмосферы, эти параметры необходимо адаптировать. Разница в температуре 10°C или атмосферном давлении 35 гПа приводит к ошибке расстояния сканирования 1 мм/100 м.

В наземных условиях этот эффект может не сказаться серьезно на результатах сканирования на коротких и средних расстояниях. Для дальних измерений или высокоточного сканирования крайне важно применять правильные параметры атмосферы.

При работе, например, в горной местности снижение температуры можно оценить как  $0.65^{\circ}$ C/100 м, а давление как 10 гПа/100 м. Для станции сканирования, расположенной на высоте 2000 м, ошибка расстояния сканирования составит около 8 мм/100 м.

#### Мешающее излучение

Поскольку лазерные сканеры работают в очень узком диапазоне частот, на точность измерения дальности может влиять внешнее излучение, например, от источников сильного внешнего освещения. В приемном блоке могут применяться специальные фильтры оптических помех, позволяющие достигать приемника только правильных частот.

#### Искажение от движения

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

Поскольку выборка каждой точки производится в разное время, любое движение объекта или сканера будет искажать собранные данные. Поэтому сканер необходимо установить на устойчивой платформе, чтобы свести к минимуму вибрации. Сам предмет также должен быть неполвижен.

Обратите внимание, что сканер также может двигаться из-за изменений температуры. Например, 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). Последние сканеры, также называемые сканирующими станциями, имеют встроенный двухосевой компенсатор, который компенсирует любое движение сканера в процессе сканирования.

#### 2.6.4 Методологические ошибки

Методологические ошибки — это ошибки, связанные с выбранным методом опроса или опытом пользователя с данной технологией. Например, если пользователь устанавливает плотность сетки (разрешение) выше, чем поточечная точность лазерного сканера, сканирование будет иметь передискретизацию. Из-за передискретизации сканирования создается дополнительный шум, и требуемое время обработки резко увеличивается. Еще одним возможным источником ошибки может быть неправильный выбор сканера. При использовании сканера с максимальной дальностью, близкой к максимальной дальности сканируемого объекта, эти сканы будут содержать менее точные измерения и возможный шум.

Возможные ошибки, возникающие на этапе регистрации или консолидации, также классифицируются в этой теме. В зависимости от метода, используемого для регистрации нескольких облаков точек, вносятся ошибки. Эти ошибки возникают как при косвенной регистрации/географической привязке, так и при прямой регистрации/географической привязке.

## 2.7 Современное лазерное сканерное оборудование

Современные современные лазерные сканеры полностью интегрированы для более быстрой настройки. Они объединяют сканер, панель управления, внутреннюю память и аккумулятор в одном устройстве. Также встроены специальные двухосевые компенсаторы для автоматического выравнивания сканера. Некоторые сканеры имеют монтажные приспособления для крепления приемников GPS и/или компенсаторов INS для непосредственного позиционирования и ориентации сканера в пространстве. Чтобы добавить информацию о цвете с высоким разрешением к измеренным облакам точек, в некоторые сканеры встроены высококачественные цифровые камеры или предусмотрено монтажное устройство.

Технология лазерного сканирования постоянно развивается:

- Специальные цели со встроенными приемниками GPS избавляют от необходимости записывать цели с помощью тахеометров.
- Аппаратная однородная фильтрация облака точек
- Объединение лучших характеристик времяпролетных и фазовых сканеров в одном сканере.

## 3. Лазерное сканирование на практике

Использование лазерного сканера для записи здания — это не просто нажатие кнопки и ожидание результатов. Это требует глубоких знаний оборудования и процесса сканирования. Некоторые этапы процесса сканирования полностью автоматизированы, в то время как другие по-прежнему трудоемки. В этой главе мы обсудим процесс наземного лазерного сканирования.

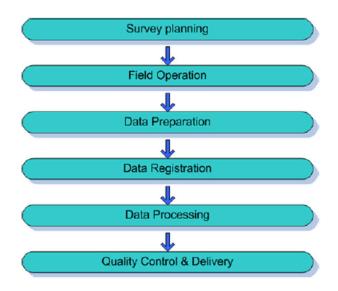


Рисунок 25 – Конвейер наземного лазерного сканера

## 3.1 Планирование исследования<sup>1</sup>

В настоящее время не существует стандартной процедуры планирования съемки для наземного лазерного сканирования. Однако, по мнению сообщества пользователей лазерного сканирования, план обследования должен включать как минимум следующие темы (см. рис. 26):

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

#### 3.1.1 Определить цели и задачи

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

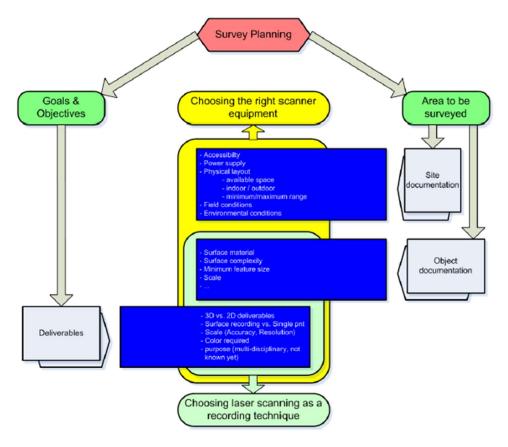


Рисунок 26 – Блок-схема планирования обследования

- Почему клиент хочет, чтобы этот объект был записан, и что он/она хочет делать с записанными данными?
- Причина регистрации объекта или здания может дать представление о требованиях к результатам и их точности. Часто клиент может подумать, 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 записи своего здания, потому что он настроен скептически и полагается на использование традиционных методов. Прислушиваясь к требованиям клиентов, можно предложить руководство по соответствующей методике измерения.
- Какие результаты требуются?

В тесной связи с мотивацией для записи нам необходимо определить требуемые результаты. Эти результаты могут варьироваться от 2D-планов и фасадов до 3D-моделей или даже 3D-анимации. В некоторых случаях клиенту может потребоваться только необработанное облако точек для архивирования. Особенно важен уровень детализации (минимальный размер элемента) результатов, поскольку он помогает определить ожидаемое разрешение (т. е. плотность точек).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Этот абзац можно сравнить с примечаниями по планированию Metric Survey.

#### 3.1.2 Анализ области, подлежащей обследованию

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

Полезную информацию может дать не только само здание, но и его окрестности. Сайт может быть разбросан препятствиями, ограничивающими возможные позиции установки лазерного сканера, или могут быть даже временные ограничения на вход на сайт (например, запись тоннелей метро). Косвенно возможные положения установки лазерного сканера определяют минимальный и максимальный диапазон, который сканер должен иметь возможность записывать.

Используя все эти данные, можно принять решение о правильной технике записи и, если выбрано лазерное сканирование, определить тип сканера. Лазерное сканирование — высокоразвитая технология, но не всегда самое эффективное решение любой проблемы. Иногда гораздо проще и эффективнее использовать другую технику записи. Возможные причины выбора лазерного сканирования:

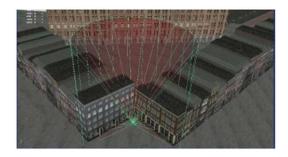
- Очень сложная структура поверхности (органические формы)
- Требуются 3D-результаты
- Требование измерения поверхности вместо измерения отдельных точек
- Записи данных, которые могут использоваться междисциплинарной командой для различных целей.
- Архивирование без априорного знания будущего использования
- Ограничения доступа
- Так далее.

## 3.1.3 Определение оптимальных мест сканирования

После того, как документация на объекте собрана и лазерное сканирование выбрано как наиболее эффективный метод записи, необходимо спланировать сканирование и целевые позиции.

Следует выбирать оптимальные места для станции сканирования, чтобы гарантировать максимальный охват и точность при минимальном количестве установок. Как уже упоминалось в параграфе 2.6, точность измерения зависит от диаметра следа от данной настройки сканера, что указывает на то, что угол падения (см. Рисунок 30) и расстояние 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 правил с приоритетом, которые следует учитывать при определении оптимального положения сканера.



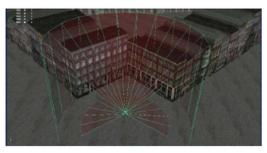


Рисунок 27 — Плохое расположение сканера с очень наклонными углами (слева) — Правильное расположение сканера (справа)

- Найдите позиции, обеспечивающие охват большой площади без препятствий на линии обзора и дающие наименьшее количество теней.
- Проверьте, выполняются ли минимальные/максимальные пределы диапазона сканера для достижения определенной точности, чем больше расстояние до объекта, тем ниже точность и разрешение.
- Сведите к минимуму появление малых углов пересечения, под острыми углами лазерный луч не так хорошо отражается обратно к сканеру, что приводит к снижению точности.

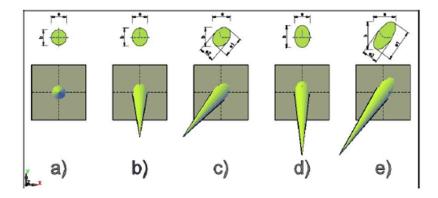


Рисунок 28 – Лазерный след при сканировании под разными углами

- Попробуйте уменьшить количество позиций сканирования.
- Другими важными фактами, которые следует учитывать, являются:
- Здоровье и безопасность
- Окружающая среда (вибрация, ветер...)
- Высота сканера над землей
- Видимость искусственных или естественных целей

#### 3.1.4 Определение оптимального местоположения цели

Наряду с оптимальным расположением сканера также важны типы целей, их положение и/или геометрическая конфигурация. Мишени в основном используются для регистрации сканов, сделанных из разных позиций сканирования. В настоящее время доступно большое разнообразие типов мишеней: световозвращающие мишени, сферические мишени, бумажные мишени, призматические мишени... В ближайшем будущем у нас появятся мишени даже со встроенными приемниками GPS.

Одно важное замечание при использовании целей заключается в том, что они должны быть широко разнесены не только в направлениях х и у, но и в направлении z. Об этом часто забывают и иногда все цели просто ставят на землю.

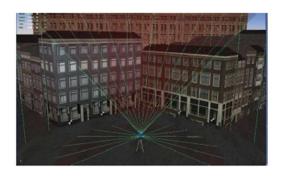




Рисунок 29 – Плохая конфигурация цели (слева) – Хорошая конфигурация цели (справа)

Некоторые целевые конфигурации не предполагают уникального решения процесса регистрации. Например, если все цели лежат на одной линии, остается 1 степень свободы, а именно вращение вокруг этой линии.

Специальные световозвращающие мишени и сферические мишени часто предоставляются компаниями-разработчиками сканеров. Эти мишени предназначены для отражения большей части лазерного луча обратно в сканер. Таким образом, сканер может автоматически обнаруживать эти цели и после процесса точного сканирования определять точный центр, подгоняя примитивную форму к измеренному облаку точек.

Иногда используются бумажные мишени, потому что они намного дешевле световозвращающих или сферических мишеней. Иногда к головке сканера крепится световозвращающая призма. Зная смещение между отклоняющим зеркалом сканера и призмой, положение сканера можно определить, измерив призму тахеометром.



Рисунок 30 – Типы искусственных целей

В зависимости от используемого метода регистрации в каждом сканировании должно быть не менее 4 надлежащим образом распределенных контрольных точек/целей XYZ. Более подробное объяснение методов регистрации и соответствующих им оптимальных целевых конфигураций описано в параграфе 3.5.

#### 3.1.5 Управление данными

Перед началом сканирования важно подумать о хранении данных. Например, при использовании Leica HDS4500 1 сканирование занимает примерно 140 Мб. В среднем в день сканирования можно выполнить 20–30 сканирований, в результате чего будет создан набор данных размером примерно 7 ГБ. Это требует тщательного планирования.

### 3.2 Эксплуатация в полевых условиях

#### 3.2.1 Подготовка обследования

Этап подготовки обследования включает в себя принятие решения о методе регистрации, который будет использоваться. Эти методы можно разделить на три категории: регистрация с использованием трехмерного обратного сечения отсканированных целей, регистрация путем установки лазерного сканера на известные контрольные точки и регистрация с использованием ограничений «облако-облако» (подробнее см. главу 3.5).

#### 3.2.2 Настройка сканера

Процедура настройки лазерного сканера обычно аналогична процедуре настройки тахеометра. Выполняются следующие шаги (Рисунок 31):

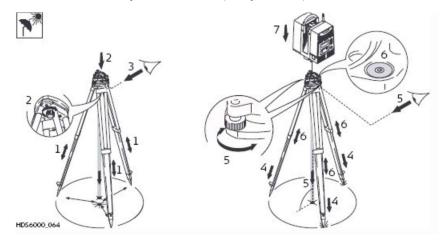


Рисунок 31 – Настройка лазерного сканера

- Установка штатива: откройте штатив и выдвиньте ножки. Убедитесь, что штатив стоит на устойчивом основании. Обычно сканер размещают на уровне глаз. Когда необходимо сканировать область пола, полезно даже более высокое положение, поскольку оно обеспечивает лучший угол наклона.
- Прикрепите сканер, поместив его на штатив и зафиксировав на месте.
- В зависимости от метода регистрации сканер может располагаться над известной контрольной точкой.

• Выровняйте сканер: изменив длину двух ножек штатива, используемых для позиционирования штатива, выровняйте верхнюю поверхность штатива с помощью уровня «бычий глаз». Пузырь должен быть внутри внутреннего круга. Будьте максимально точны. При размещении сканера над контрольной точкой эта процедура не должна изменить точку, над которой вы находились в шаге 3.

#### 3.2.3 Запись данных

Перед началом сканирования само сканирующее устройство необходимо подключить к ноутбуку, способному принимать и хранить все точки, поступающие со сканера, и управлять свойствами сканера. Питание сканера может подаваться от аккумуляторов, генератора или напрямую от сети.

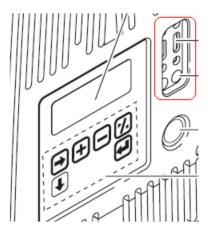


Рис. 32. Полностью интегрированное сканирование и управление в современных сканерах

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

#### 3.2.4 Настройки сканера

После того как программное обеспечение контроллера сканирования установило соединение со сканером, необходимо указать параметры, которые будут использоваться в процессе сканирования.

#### Таргетинг

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

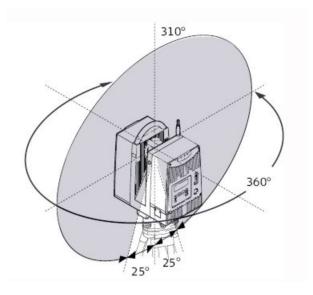


Рисунок 33 – Поле зрения современного сканера

Некоторые сканеры имеют свернутую панель управления на самом сканере, которая может определять целевую область. Это очень грубый способ определения целевой области, но очень быстрый метод.

В основном область наведения определяется с помощью управления сканером в программном обеспечении. Используя этот тип таргетинга, мы сначала делаем снимок сцены, который позволяет выбрать целевую область. Современные сканеры имеют встроенные фиксированные камеры или даже видеокамеры, чтобы показать пользователю то, что видит сканер. Затем с помощью программного обеспечения управления сканированием пользователь может выбрать целевую область с помощью поля выбора, аналогичного выбору части изображения в программном обеспечении обработки изображений.

Большинство фазовых сканеров не имеют камеры из-за своей технической конструкции. Однако эти сканеры могут записывать столько точек в секунду, что создание скана с низким разрешением занимает столько же времени, сколько другой сканер делает снимки. Затем это сканирование с низким разрешением можно использовать 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 по-прежнему определяют разные аспекты процесса лазерного сканирования.

Разрешение в основном определяется мельчайшими деталями структуры поверхности, которые должны быть узнаваемы в конечном результате. Следовательно, это также напрямую связано с масштабом результата. Фактически, лазерные сканеры преодолевают интеллектуальную обработку, которую люди выполняют при анализе здания (то есть разбивают здание на плоскости, линии и точки), записывая огромный набор 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 сканировать и, следовательно, тем больше времени это займет. Помимо временных рамок, увеличивается размер хранилища набора данных. Оператор должен помнить, что сканирование с более высоким разрешением, чем одноточечная точность сканера при измерении расстояния, может привести к избыточной выборке и, следовательно, к большему количеству 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 от сканера. Это расстояние можно ввести вручную с помощью программного обеспечения, или датчик может зафиксировать значение расстояния до точки и определить разрешение на этом расстоянии от сканера. Точки, отсканированные дальше этого расстояния, будут иметь более низкое разрешение, в то время как точки, отсканированные ближе, будут иметь более высокое разрешение. Как правило, рекомендуется брать точку зонда в самой дальней точке сканирования.

Некоторое программное обеспечение для управления сканированием обеспечивает быструю настройку разрешения, т. е. низкое, среднее или высокое разрешение. Эти быстрые настройки устанавливают разрешение на определенное значение для определенного расстояния. В инструкции к сканеру приведены таблицы, иллюстрирующие эффективное разрешение на разных расстояниях для каждой настройки.

English Heritage, вневедомственная государственная организация Соединенного Королевства, обладающая значительным опытом в управлении исторической средой, создала таблицу, которая помогает пользователю определить подходящее решение для проекта.

Эта таблица формируется на основе следующей формулы:

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

Где Q — качество данных, m — плотность точек (разрешение) на объекте, а  $\lambda$  — минимальный размер элемента или требуемая плотность точек. Таким образом, значение Q указывает уровень, до которого был просканирован объект.

feature size	example feature	point density required to give 66% probability that the feature will be visible	give a 95% probability that
10000mm 1000mm 100mm 10mm	large earth work small earth work/ditch large stone masonry flint galleting/large tool marks Weathered masonry	3500mm 350mm 35mm 3.5mm 0.35mm	500mm 50mm 5mm 0.5mm

Рисунок 34 — Надлежащая плотность точек (разрешение выборки) для различных размеров объектов культурного наследия

#### Первичная фильтрация

Во время сканирования данные сканирования можно фильтровать с помощью первичных фильтров, иногда также называемых аппаратными фильтрами. Предусмотрены различные варианты: фильтрация по диапазону, фильтрация по значению отражательной способности или их комбинация. Первичную фильтрацию можно использовать, чтобы убедиться, что собранные данные находятся в пределах диапазона точности 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)

Как только поле зрения определено и установлено правильное разрешение, можно приступать к самому сканированию. Процесс сканирования практически полностью автоматизирован. После нажатия кнопки управления в программе управления сканированием или непосредственно на панели управления сканера 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 отображаются непосредственно на экране в трех измерениях и обеспечивают обзор области, которая уже была отсканирована. После сканирования рекомендуется проверить сканирование на наличие непредвиденных препятствий, которые вызывают перекрытие областей в данных сканирования.

В большинстве программ управления сканированием параметры цели и параметров могут быть записаны в сценарии, поэтому впоследствии можно сканировать несколько областей с разными разрешениями. Можно создать сценарий, позволяющий сканировать определенные области с более высоким разрешением во время общего сканирования, чтобы можно было использовать более определенные функции в качестве функций регистрации в процессе регистрации.

В зависимости от выбранного разрешения и целевой области процесс сканирования может занять от 5 до 120 минут и даже больше. В течение этого времени должны быть сделаны заметки об обследовании или, если во время планирования обследования не был сделан эскиз окружающей среды, это может быть время сделать это. Эскиз и примечания к съемке должны показывать/описывать сканируемый объект(ы), целевые позиции и их метки, а также позиции сканирования. Следует также отметить конкретные внешние условия, влияющие на сканирование и используемые настройки сканера.

### Сканирование целей

Когда для регистрации сканов на этапе регистрации используются искусственные и/или естественные цели (см. параграф 3.5), эти цели должны быть помечены и измерены очень точно.

Из-за ограниченной скорости времяпролетного сканера сканирование выполняется в два этапа. Сначала объект сканируется с разрешением, подходящим для достижения запрошенных результатов. На втором этапе производится точное сканирование целей (рис. 39) для достижения более высокой точности при определении их центрального положения.

Однако в общественных местах было бы полезно сначала сканировать цели, а затем сканировать объект, чтобы избежать любого возможного перемещения целей.

После завершения глобального сканирования (фаза 1) большинство программ управления сканированием предоставляют инструменты для автоматического обнаружения искусственных целей при сканировании. Поскольку эти искусственные цели сделаны из материала с высокой отражающей способностью, их коэффициент отражения намного выше, чем у окружающей среды. Однако, поскольку эти автоматические инструменты обнаружения часто дают ошибочные результаты, рекомендуется всегда проверять результаты и следить за тем, чтобы ни одна цель не была пропущена.

Как только приблизительные положения искусственных целей известны, они сканируются с очень высоким разрешением (фаза 2). Программное обеспечение управления сканированием затем может автоматически подгонять определенную форму цели к цели и определять ее точную центральную точку.

Иногда точки детализации используются вместо искусственных целей или вместе с ними. Точка детализации — это геометрическая точка, которая хорошо различима и может быть точно определена благодаря своей форме. Эти точки также сканируются с очень высоким разрешением. Хорошей практикой является вручную вставить вершину для этой естественной цели и пометить ее на месте, чтобы уменьшить проблемы неправильной интерпретации на этапе обработки.

Важно отметить, что фазовые сканеры последнего поколения сканируют с высокой скоростью, так что сканирование на 360° с очень высоким разрешением может занять от 5 до 10 минут. Мишени автоматически сканируются с высоким разрешением, поэтому их не нужно сканировать повторно после этого. Этот способ работы, конечно, намного быстрее, поскольку пользователю не нужно идентифицировать и точно сканировать эти цели на месте. Однако маркировка целей теперь должна быть сделана в офисе и требует очень хороших полевых заметок и эскизов места.

#### 3.3.2 Измерение целей

Частью процесса сканирования является запись целей с помощью тахеометра. Если требуется несколько установок тахеометра, необходимо выполнить ход или обратную засечку, чтобы свести к минимуму ошибки в процессе записи. Поскольку предполагается, что учащиеся, работающие с этим учебным пособием, имеют опыт проведения геодезических работ, этот процесс подробно не описывается.

## 3.3.3 Проверка полноты

Как уже упоминалось, очень важно перепроверить полноту сканирования после завершения сканирования. Осознание того, что часть данных сканирования отсутствует, когда вы находитесь в офисе, может привести к дорогостоящему повторному посещению объекта. Второй визит может потребовать больше времени, чем проверка полноты на месте во время первого визита. При работе с ноутбуком в этом может помочь точечное разбрызгивание (см. пункт 3.6.1).

## 3.4 Подготовка данных

Вернувшись в офис, данные анализируются и сравниваются с полевыми зарисовками и заметками. Желательно начать работу с копии исходных сканов и сохранить оригиналы в качестве резервной копии. Различные типы сканеров хранят информацию об облаке точек в разных форматах. Для целей архивирования важно, чтобы формат файла был легко доступным и узнаваемым. Если к нему можно получить доступ напрямую, без какого-либо декодирования, позже его можно будет легко преобразовать в любой другой формат, читаемый соответствующим программным обеспечением. Формат файла также должен содержать данные в самом элементарном формате вместо использования наиболее предпочтительного формата для повторной обработки.

Всегда добавляйте файл метаданных к файлам резервных копий, содержащим полевой эскиз, полевые заметки и все данные, собранные уже на этапе подготовки задания сканирования.

Перед обработкой облаков из набора данных удаляются сканы, затронутые экстремальными условиями окружающей среды, или ошибочные сканы из-за ошибок человека. Сканы, которые не были удалены, теперь должны быть расставлены по приоритетам в соответствии с «лучшими представлениями». Расстановка приоритетов осуществляется с помощью полевых заметок и зарисовок.

В некоторых случаях также требуется очистить некоторые сканы перед этапом регистрации. Когда цели находятся 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 фазы регистрации.

# 3.5 Регистрация и географическая привязка

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

С выравниванием или регистрацией напрямую связана географическая привязка всего набора данных. Географическая привязка означает, помимо выравнивания сканов, также географическую привязку набора данных к фиксированной системе координат. В следующих параграфах объясняются возможности регистрации и географической привязки.

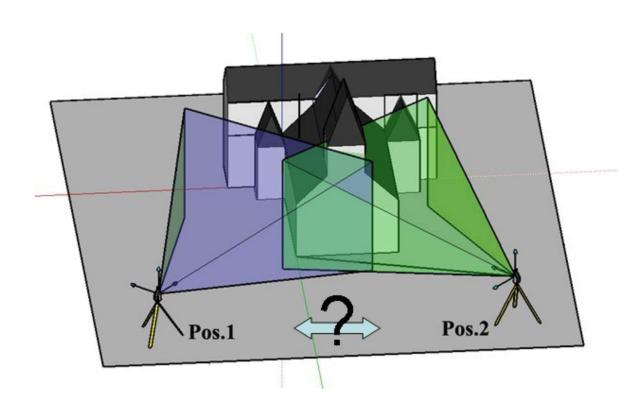
В этих примечаниях методы регистрации подразделяются на методы прямой и косвенной регистрации или методы географической привязки.

#### 3.5.1 Косвенная регистрация и географическая привязка

Косвенная регистрация подразумевает использование целевых функций (искусственных или естественных) в самой сцене для выравнивания наборов данных. Если требуется географическая привязка, сами цели должны быть записаны и преобразованы в известную систему координат с использованием признанных методов съемки.

Для выполнения косвенной регистрации необходимо как минимум три целевых соответствия между двумя сканами. Однако всегда лучше иметь более трех, чтобы можно было свести к минимуму ошибки, выполнив оптимизацию по методу наименьших квадратов.

Легкодоступные места не представляют проблемы для размещения мишеней. Искусственные цели бывают разных форм. Существуют специальные мишени от компаний-производителей лазерных сканеров, изготовленные из материала с высокой отражающей способностью, но также можно использовать мишени из печатной бумаги. Когда принтер или специальные мишени недоступны, мишени можно импровизировать, используя предметы, к которым можно подобрать идеальную геометрическую поверхность. Например, в качестве мишеней можно использовать куски цилиндрической трубы. Используя программное обеспечение для обработки сканирования, идеальный цилиндр можно подогнать к точному скану такого объекта, чтобы определить центральную ось с очень высокой точностью. Если цилиндры затем разместить как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, их можно использовать для выравнивания различных сканов.



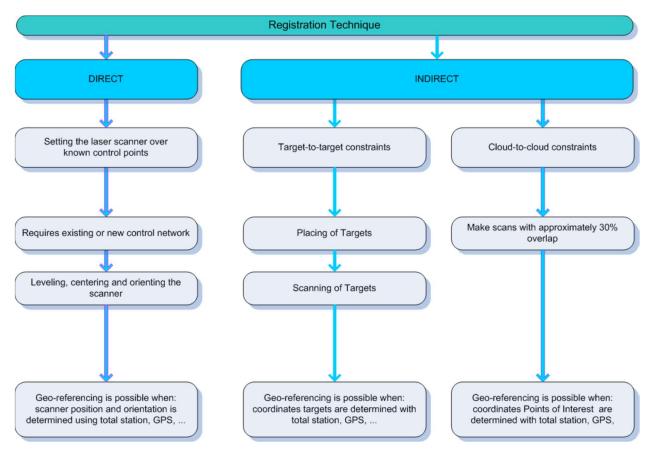


Рисунок 35 – Совмещение между двумя соседними сканами (выше) – Методы совмещения (ниже)

## Целевая регистрация

В труднодоступных местах, например, слишком высоко, можно использовать естественные цели. Естественными целями являются точки интереса в самой конструкции, которые можно идентифицировать с высокой точностью, например, края окон или карнизы. Как сообщает English Heritage в своей публикации [28], результаты регистрации, полученные с использованием этих естественных целей, хуже, чем с использованием искусственных целей. Причина этого двояка:

- общие черты в разных облаках точек не состоят из одинаковых точек, которые, по сути, представляют собой круги диаметром в несколько миллиметров из-за расходимости лазерного луча;
- Выявление общих признаков довольно субъективно, особенно при сканировании под большим углом.

## Облачная регистрация

Другой способ регистрации двух облаков точек — использование перекрытия облаков точек. Если два облака точек имеют достаточное перекрытие (обычно 30–40%), для выравнивания обоих наборов данных можно использовать метод, называемый итеративной обработкой закрытых точек или ICP.

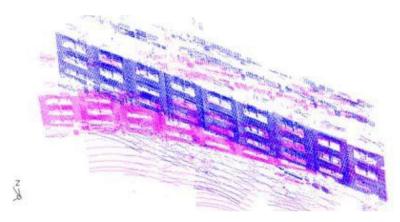


Рис. 36. Распространение ошибки из-за межоблачной регистрации нескольких сканирований фасадов

Этот метод требует, чтобы пользователь вручную выбрал как минимум 3 соответствующие точки в облаках точек. Поскольку эти 3 точки никогда не будут точно такими же точками (см. объяснение в предыдущем абзаце), алгоритм ICP итеративно проверяет расстояния между всеми точками облаков точек и оценивает преобразование для выравнивания обоих наборов, что приводит к минимальной ошибке.

Правила для целевых конфигураций, упомянутые в предыдущем абзаце, также применимы к конфигурации точки при межоблачной регистрации.

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

### Поверхностная регистрация

В 2006 г. А. Грюн опубликовал новый метод выравнивания наборов данных путем сопоставления геометрии поверхности двух сканирований. Его алгоритм оценивает евклидовы расстояния между участками поверхности методом наименьших квадратов и пытается итеративно минимизировать это расстояние, как в алгоритме ICP. Этот метод предлагает высокую гибкость для любого типа проблемы соответствия 3D-поверхностей, а также статистические инструменты для анализа качества конечного результата.

Поверхностная регистрация особенно полезна, когда некоторые сканы содержат значительное количество шума. В этом случае лучше сначала очистить и связать отдельные сканы, чтобы каждый скан можно было обработать с соответствующими настройками. Когда все сканы преобразуются в поверхности, совмещение поверхностей может использоваться для выравнивания различных сканов.

#### 3.5.2 Прямая регистрация и географическая привязка

Прямая регистрация означает, что положение и ориентация сканера вычисляются напрямую. Это можно сделать двумя способами. Одним из примеров является лазерный сканер с некоторыми возможностями тахеометра, где сканер можно расположить непосредственно над известной точкой с помощью лазерного отвеса. Ориентацию можно определить, просканировав только 1 цель в следующем положении установки лазерного сканера. Эти лазерные сканеры также имеют двухосевой компенсатор, чтобы они

выравнивались в определенных пределах. Это выравнивание накладывает третье ограничение на ориентацию скана.

Иногда над вертикальной осью вращения сканера закрепляют специальный отражатель. Точное положение этого рефлектора по отношению к центроиду лазерного луча можно определить с помощью процедуры калибровки. Если это положение известно, отражатель можно измерить с помощью тахеометра, как это делается при настройке замкнутого (или открытого) полигона для сети хода. Другой способ определить положение сканера — установить GPS-приемник на сканер.

Этот метод уменьшает количество размещаемых целей и, следовательно, позволяет избежать довольно жестких требований к конфигурации цели. Сканы также не нуждаются в перекрытии. Принимая во внимание все эти соображения, этот метод часто быстрее, чем использование косвенной регистрации.

Когда требуется географическая привязка, измеренное положение отражателя может быть преобразовано в конкретную известную систему координат с использованием общих методов съемки.

#### 3.5.3 Общий аспект регистрации и пространственной привязки

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

- При выполнении совмещения убедитесь, что невязки глобального процесса совмещения равны или превышают геометрическую точность, требуемую конечным результатом.
- Когда регистрация выполняется исключительно с использованием расчета обратной засечки (непрямой), каждое сканирование должно содержать не менее 4 надлежащим образом распределенных контрольных точек/целей XYZ. Это переопределяет геометрическую взаимосвязь между двумя наборами данных, и поэтому можно использовать оптимизацию методом наименьших квадратов для минимизации ошибок в целевых записях.
- Всегда включайте остатки процесса регистрации и геометрическую точность оцениваемых параметров в отчет об исследовании.
- Добавьте иллюстративные фотографии/скриншоты неправильных элементов данных сканирования, вызванных трещинами или элементами объекта, которые могут быть неверно истолкованы как ошибки в процессе регистрации, и отметьте их в отчете об исследовании.
- Не устанавливайте искусственные мишени в местах, где они скрывают важные детали объекта. Не делайте цели слишком большими.
- При установке мишеней на поверхность объекта убедитесь, что клей не повредит структуру.
- Старайтесь избегать использования естественных целевых точек, поскольку они менее точны, чем искусственные.
- Программное обеспечение управления сканированием должно быть адаптировано к типу используемых целей. Например, некоторые плоские световозвращающие мишени

демонстрируют эффект ореола, вызванный многократным отражением лазерной энергии от мишени в непосредственной близости от центра мишени. Надлежащее программное обеспечение может уменьшить количество возвратов в целевой центр, например. с помощью взвешивания по интенсивности отдельных возвратов [11].

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

# 3.6 Обработка трехмерного облака точек

Обработка облака точек означает процесс преобразования необработанного зарегистрированного облака точек в окончательный результат. Эти результаты поставляются в самых разных форматах: очищенные данные облака точек, стандартные 2D-чертежи (например, планы, фасады, сечения), полностью 3D-текстурированные модели для анимации обхола.

Часто производители сканеров демонстрируют впечатляющие видеоролики, в которых облака точек превращаются в полностью текстурированные модели менее чем за одну секунду. Однако на самом деле этот процесс по-прежнему требует очень много времени и в основном выполняется вручную. На рисунке ниже представлен обзор различных этапов процесса лазерного сканирования и степени их автоматизации.

В целом обработку трехмерного облака точек можно разделить на две категории. Результаты можно извлечь прямо из облака точек без дальнейшей обработки или сначала создать 3D-модель поверхности из облака точек и извлечь результаты из этой модели поверхности. Выбор метода во многом зависит от требуемых результатов. Например, когда требуется только ограниченное количество поперечных сечений, лучше извлекать их непосредственно из облака точек. Однако, когда требуется больше сечений (+50), второй метод более эффективен, поскольку существуют автоматизированные инструменты для создания нескольких сечений из модели с сеткой. Кроме того, модель поверхности добавляет больше ценности и понимания, чем просто необработанное зарегистрированное облако точек.

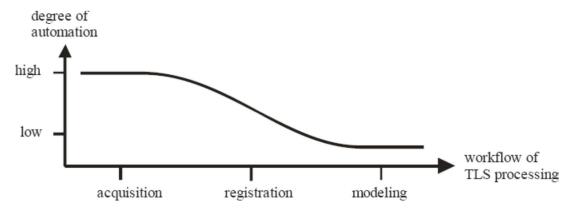


Рисунок 37 – Автоматизация рабочего процесса наземного лазерного сканирования

### 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 коэффициента отражения лазера. 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 у пользователя возникнут трудности с распознаванием структур из облака. Когда каждой точке присваивается значение отражательной способности или значение цвета, общая структура становится понятной.

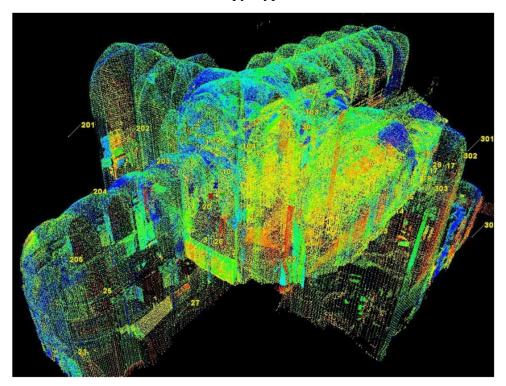


Рисунок 38 – Неорганизованное облако точек

Поскольку большинство лазерных сканеров сканируют сцену столбцами и строками, одним из способов представления облака точек является очень простой способ — карта глубины. Карта глубины представляет собой матричную структуру (2D), в которой каждый пиксель представляет собой расстояние от 3D-точки до сканера в виде значения серого. Поскольку этот тип представления включает соседнюю информацию, он очень полезен в алгоритмах обработки облака точек и известен как организованное облако точек.



Рисунок 39 – Карта глубины

Используя сложные алгоритмы создания сетки (триангуляции), можно соединить соседние точки, чтобы сформировать поверхности. Это обеспечивает более близкое представление к реальности, потому что поверхностные структуры или сетки непрозрачны, поэтому точки, лежащие позади других, не видны. Вычисляя локальные направления нормалей к поверхности, можно использовать искусственное затенение, чтобы выделить детали поверхности.

Поскольку создание сетки, особенно из неорганизованного облака точек, является сложным и может занять значительное время, были попытки найти альтернативы быстрому созданию грубого представления облака только для просмотра и анализа. В результате родилась идея лазерного точечного сплаттинга. Разбивка точек генерирует поверхности (небольшие элементы поверхности) для каждой точки в облаке из необработанных данных лазерного сканера. Каждый серфинг представлен небольшой примитивной формой поверхности (круг, эллипс...) в 3D, которая наследует свою нормаль, вычисленную из соседних точек. Это приводит к очень высокой скорости представления поверхности.

#### 3.6.2 Улучшение данных

## Фильтрация шума

Первым шагом в процессе построения сетки является удаление зашумленных данных из облака точек. Если шум был введен из-за ветра, плохого отражения от поверхности и т. д. (см. главу 2.6), сетка будет содержать треугольники, соединяющие эти зашумленные точки с правильными точками. Это приводит к сетке, полной шипов. Поэтому важно удалить эти шумные точки на первом этапе.

Часто оператор может легко идентифицировать детали, которые сканируются, но не требуются для окончательного результата. Поэтому рекомендуется, чтобы этот оператор выполнил первый анализ облака точек и вручную удалил все ненужные точки из набора данных.

Автоматические алгоритмы, удаляющие зашумленные точки, в основном основаны на двух принципах. Первый принцип заключается в том, что точки, которые практически не имеют других точек в своем непосредственном окружении, считаются выбросами. Они, вероятно, 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, а затем удалить из облака точек.

Еще один принцип удаления шума — слегка сдвинуть точки, чтобы добиться оптимальной гладкости поверхности. Эти алгоритмы пытаются локально подогнать плоскости (произвольной формы) к точкам в облаке точек. Когда центральная точка находится очень далеко от аппроксимируемой плоскости, она перемещается к плоскости, чтобы обеспечить большую согласованность со своими соседями.

Существуют и другие шумовые фильтры, некоторые специализированные в зависимости от типа сканера, другие удаляют систематические ошибки. Конечно, необходимо соблюдать осторожность при удалении шумных точек. Функции 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 фаз может легко измерять до 20 миллионов треугольников. С таким количеством треугольников становится трудно работать на стандартном оборудовании. Как правило, количество точек необходимо уменьшить перед созданием сетки, и это уменьшение точек можно выполнить двумя способами.

Самый простой способ уменьшить количество точек — удалить одну из каждых нескольких других. Основываясь на их трехмерном пространственном положении, точки можно удалить, сохраняя при этом полное покрытие области. Однако этот метод может удалить точки в областях, которые содержат важные функции, и, следовательно, может удалить ценную информацию.

Другой способ удаления точек — посмотреть на кривизну поверхности, чтобы определить, является ли часть поверхности гладкой или сильно изогнутой. Этот метод 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 этот метод, можно добиться надлежащего уменьшения исходного размера облака точек без потери ценных функций.

## 3.6.3 Прямое 2D-моделирование из облаков точек

Прямое 2D-моделирование из облаков точек зависит от человека. Большинство доступных пакетов программного обеспечения в этой области являются подключаемыми модулями для пакетов САПР, таких как AutoCAD или MicroStation. Специальные интерфейсы позволяют пользователю загружать в эти программы огромные облака точек для их обработки стандартными средствами САПР. Типичным программным обеспечением для выполнения этих задач является: Leica CloudWorx, Kubit Pointcloud, LFM CAD Link, ...)

Поперечные сечения, планы и фасады можно создавать, беря тонкие срезы точек из облака точек и проецируя все точки на плоскость. Затем пользователь должен вручную проследить или соединить точки, создавая линии, дуги и т. д. Пользователь делает интерпретацию углов и деталей, размер которых меньше разрешения сканирования. Это точная и трудная задача, и выполнение всего одного поперечного сечения или плана может занять значительное время. Лицо, выполняющее эту задачу, должно иметь правильное представление о здании или сооружении или иметь в своем распоряжении фотоматериалы для правильной интерпретации.

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

Фасады можно создавать двумя способами. Когда есть информация о цвете, доступная через фотографии, или доступна интенсивность отражения лазерного луча, цветные точки могут быть ортогонально спроецированы на плоскость, создавая настоящую ортофотографию. Проследив эту ортофотографию, можно сделать возвышение. Важно отметить, что точность высоты сильно зависит от разрешения сканирования.

Другой способ создания высоты — отследить важные края (например, оконные проемы, дверные проемы и т. д.) в 3D-облаке точек, а затем проецировать все эти 3D-объекты на плоскость. Этот метод требует хорошего понимания геометрии и способности быстро распознавать структуры в облаках точек.

Некоторые программные пакеты позволяют пользователю регистрировать внешние изображения в облаке точек и использовать их для монографической печати. 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 проверяться дважды, потому что трассировка края изображения часто неправильно интерпретируется программным обеспечением из-за отсутствия данных и, следовательно, не генерируется в правильном положении.

#### 3.6.4 Прямое 3D-моделирование из облаков точек

Когда форма 3D-объекта заранее известна и может быть описана геометрическими примитивами, ее можно автоматически обнаружить из облака точек. При подгонке этих геометрических фигур к облаку точек алгоритм делает предположение, что это идеальная форма. Например, скан нефтехимического завода можно легко преобразовать в 3D-модель, если предположить, что все трубы имеют круглое сечение, а соединительные элементы также имеют определенную форму. Большинство из этих приложений применяются в нефтехимической промышленности.

#### 3.6.5 Трехмерное моделирование сложных поверхностей

Как правило, конечным продуктом процесса 3D-моделирования является сетчатая модель поверхности. Соединяя все точки в облаке точек маленькими треугольниками, создается модель поверхности или сетка. Эта сетка представляет собой интерполяцию точек в трех измерениях, создающую полное представление поверхности. Для создания качественной сетки необходимо выполнить ряд шагов:

- Очистка данных (шумоподавление, удаление выбросов...)
- Передискретизация (см. 3.6.2.2)
- Создание сетки/триангуляция
- Заполнение пробелов (соединение, слияние...)
- Оптимизация сетки (прореживание...)

### Создание сетки/триангуляция

Существуют различные алгоритмы для создания сеток из облаков точек. Соединения между точками обычно состоят из треугольников или четырехугольников. Безусловно, наиболее популярными из методов построения треугольных и тетраэдральных сеток являются те, которые используют критерий Делоне. В последние годы были разработаны более сложные алгоритмы создания сетки, такие как алгоритм поворота шара или алгоритм марширующих кубов, которые способны триангулировать огромные наборы данных с низким потреблением памяти.

## Отверстие фитинг

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

#### Оптимизация сетки

Несмотря на то, что 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 аппаратные возможности. Это называется децимацией сетки.

Другие способы оптимизации описания поверхности — это аппроксимация ее математическими поверхностями. Одним из наиболее часто используемых типов поверхностей для этой задачи является NURBS (функции неоднородного рационального базиса). Эти nurbs являются математически точными представлениями поверхностей произвольной формы, таких как кузова автомобилей, корпуса кораблей или даже человеческое лицо. У них есть контрольные точки, которые направляют поверхность; однако эти контрольные точки не обязательно являются точками облака точек.

#### 3.6.6 Косвенное 2D-моделирование из облаков точек

Косвенное 2D-моделирование означает создание 2D-чертежей из 3D-моделей или объектов, созданных с помощью сетки. Этот метод полезен, когда необходимо сделать несколько поперечных сечений, например, одно поперечное сечение через каждый сантиметр, чтобы можно было создать карту контуров глубины.

Косвенное моделирование требует этапа трехмерного моделирования, как описано в главе 3.6.5. После создания модели поверхности ее можно легко пересечь плоскостями для создания поперечных сечений. Интерполяция площадей между измеренными точками выполняется автоматически на этапе построения сетки и не требует выполнения оператором.

## 3.6.7 Отображение текстуры

Карта текстуры (то есть информация о цвете или другое) отображается на поверхность формы или многоугольника. Для корректного размещения текстурной информации используются UV-карты (см. рис. 49). В отличие от x, y и z, которые являются координатами исходного 3D-объекта в пространстве моделирования, «U» и «V» являются координатами преобразованного объекта. UV-отображение преобразует 3D-объект/сетку в плоское изображение, которое затем можно использовать для прикрепления текстурной информации. Это преобразование сетки также можно описать как развертывание или перенос трехмерной формы на двухмерный холст.

Когда модель создается как полигональная сетка с помощью средства трехмерного моделирования, UV-координаты могут быть сгенерированы для каждой вершины в сетке. Один из способов заключается в том, чтобы специалист по 3D-моделированию разворачивал треугольную сетку по швам, автоматически размещая треугольники на плоской странице. UV-карта может быть создана автоматически программным приложением, вручную художником или комбинацией того и другого. Обычно

используемые карты: карты высот, карты нормалей, карты смещения, карты освещения, карты отражений и рельефа.

После создания UV-карты пользователь может раскрасить эту UV-карту, а затем спроецировать ее обратно на 3D-модель, что упрощает правильное окрашивание 3D-модели.

Вместо использования UV-карт в некоторых пакетах программного обеспечения для 3D также есть возможность проецировать и запекать информацию о текстуре на поверхности, обычно с использованием ортогональных проекций, что упрощает процесс текстурирования.

Развертка предпочтительнее проекций из-за минимального растяжения текстуры. Оба метода можно использовать и смешивать в одной 3D-модели.

При лазерном сканировании часто требуется фотографическая информация высокого разрешения для визуализации 3D-моделей. Для точного сопоставления положения камер и внутренние настройки камеры (фокусное расстояние, искажения объектива...) должны быть известны по отношению к модели. Пакеты коммерческого программного обеспечения предоставляют алгоритмы, которые позволяют пользователю вручную выбирать соответствующие точки между изображением и 3D-моделью для определения этих неизвестных параметров. При наличии достаточного количества соответствий можно рассчитать положение и параметры камеры.

В основном существуют два разных алгоритма для проецирования фотографий на 3D-модель: наложение текстуры и наложение текстуры. Драпирование текстуры можно описать как размещение фотографии на куске эластичного холста, а затем натягивание его на 3D-модель. Это означает, что области, которые не содержат много информации или вообще не содержат информации на фотографии (например, очень наклонные поверхности), будут растянуты и, следовательно, текстурированы неправильно. Отображение текстур решает эту проблему, сначала анализируя видимые части изображения, а затем только проецируя эти фотопиксели на 3D-модель.

Детализация текстурной карты зависит от разрешения, которое в основном определяется как степень двойки (т.е. 512\*256, 1024\*1024), что лучше всего подходит для графической памяти. Новое поколение графических карт лучше справляется с текстурами, которые не имеют степень двойки.

#### 3.7 Контроль качества и доставка

Качественный аспект съемки с использованием лазерных сканеров требует тщательного рассмотрения на протяжении всего процесса измерения и обработки. Каждый раз, когда сканер настраивается на сбор данных (до, во время и после), определенные элементы данных должны проверяться и сверяться с ожидаемыми или прогнозируемыми результатами. Большинство технических факторов, которые могут повлиять на качество данных, подробно описаны в 2.6. В дополнение к этим факторам операторы сканера также должны проверять такие факторы, как достаточное покрытие площади, равномерное распределение точек с требуемым разрешением, эталонная фотография с камеры с высоким разрешением, правильное получение отражающих целей сканера и получение дополнительных контрольных размеров, которые были бы очень полезны при дальнейшие этапы обработки.

Качество начинается с полного понимания спецификации проекта. Это понимание позволяет сделать правильный выбор сканера, правильного разрешения сканирования, подходящего метода регистрации и так далее. Например, выбор сканера с недостаточным радиусом действия, использование недостаточного количества целей и позиций сканирования, недопущение надлежащего перекрытия (если принято решение зарегистрировать ваши сканы с использованием перекрывающихся сканов) и, что наиболее важно, неиспользование правильного разрешения сканирования будет иметь прямой эффект. на качество конечного продукта, когда он производится из данных облака точек.

Надлежащая документация на месте обеспечивает достижение оптимального качества. Дополнительные эскизы, справочные фотографии, контрольные размеры будут использоваться на последующих этапах обработки.

В общем, цель должна состоять в том, чтобы достичь точности регистрации, в десять раз меньшей, чем точность требуемого результата. Имея это в виду, есть много других элементов, которые могут повлиять на точность; поэтому всегда лучше стремиться к лучшим результатам регистрации.

Блок-схема на следующей странице (Рисунок 40) дает общее представление об обеспечении качества съемки с помощью лазерного сканирования.

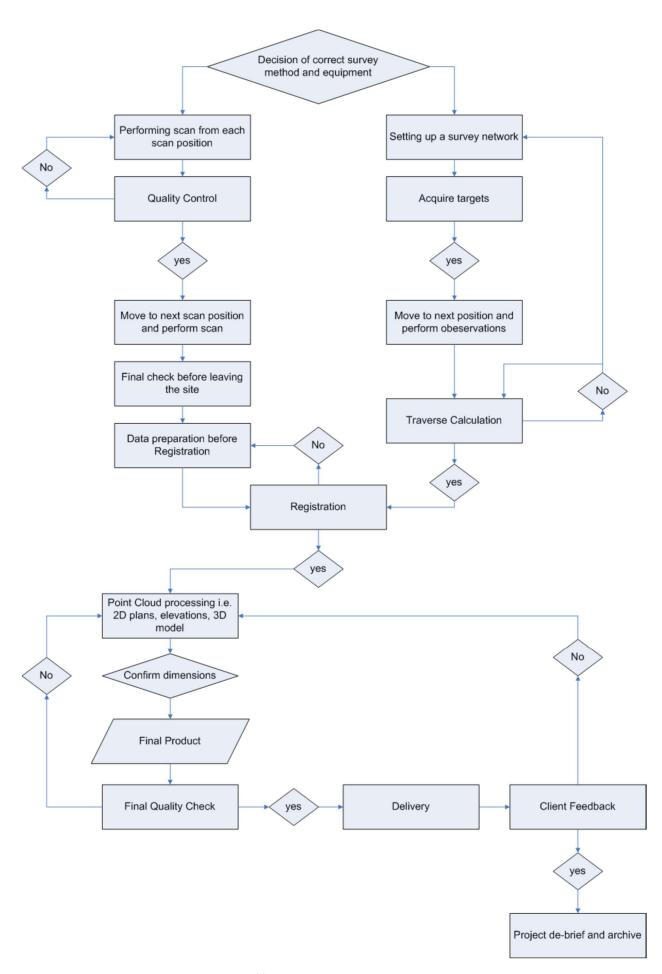


Рисунок 40 — Блок-схема контроля качества