

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПО ЦИФРОВОМУ СОПРОВОЖДЕНИЮ СТРОИТЕЛЬСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ФОТОГРАММЕТРИИ

Кирияк Н.Ю. (АО «Прорыв», Москва, Россия)

Введение

Предметом исследования является изучение возможности применения методов фотограмметрии для создания 3D-моделей помещений и оборудования на всех этапах строительства, для возможности оперативного контроля отклонений от проектных моделей.

1. Фотограмметрия, ее преимущества и области применения

Фотограмметрия позволяет определить по снимкам исследуемого объекта его форму, размеры и пространственное положение в заданной системе координат. Название происходит от греческих слов *photos* (фото), *gramma* (запись) и *metreo* (измерять).

Фотограмметрическая обработка снимков имеет следующие преимущества:

- большая производительность труда благодаря тому, что измеряются не сами объекты, а их изображения. По снимкам объекта вычисляется подробная информация о форме, положении в пространстве, цвете;
- достаточно высокая точность измерений, потому что съемку объектов проводят с использованием качественных фотокамер, а сами снимки обрабатываются строгими математическими алгоритмами с помощью компьютеров;
- информацию об объекте в цифровом и графическом виде можно получить, находясь вдали от самого объекта. Такое возможно, когда объект находится в опасной для здоровья человека среде или физически удален;
- возможность получения информации о состоянии всего объекта и отдельных его частей.

Фотограмметрию используют в различных областях науки, техники и производства, например [1]:

- для определения деформаций конструкций, происходящих в ходе эксплуатации и со временем;
- при изысканиях железных и автомобильных дорог, трасс трубопроводов, линий электропередач и других линейных объектов;
- при гидротехнических, гляциологических, геологических, географических изысканиях и исследованиях;
- при реставрации памятников архитектуры, скульптуры;
- для фиксации дорожно-транспортного происшествия;
- для определения микрорельефа по снимкам с микроскопа;
- для составления прогнозов погоды, научного прогнозирования месторождений полезных ископаемых, изучения океанов и морей, определения характеристик снегового покрова, анализа сельскохозяйственного производства и охраны природной среды по снимкам, полученным с искусственных спутников Земли.

Много статей и опыта использования основаны на применении съемки предметов, зданий снаружи с разных ракурсов, при помощи кругового обхода или облета (как на рис. 1). Основная особенность, которую необходимо исследовать – возможно ли с помощью фотограмметрии создавать модели, фотографируя объект (в данном случае помещение) изнутри.

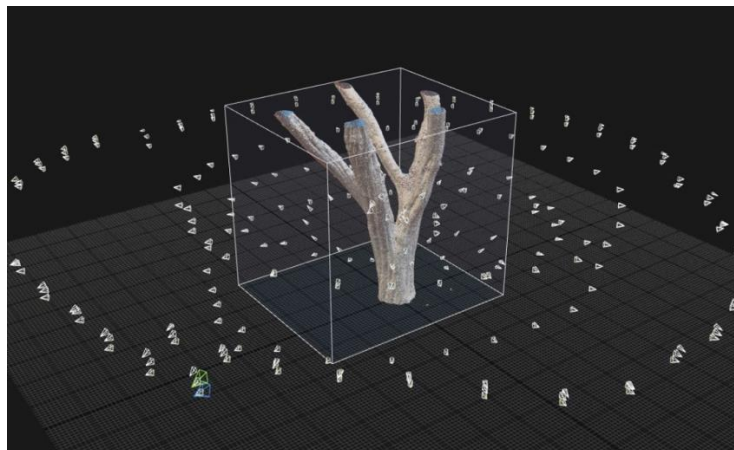


Рис. 1. Опыт применения съемки вокруг объекта

2. Постановка задачи

При реализации проекта на этапе его разработки создаются 2D- и 3D-модели объектов: зданий, оборудования, наполняющего эти здания, компоновки оборудования внутри помещений. В дальнейшем, при строительстве и наполнении помещений, могут происходить отклонения от проекта. Чтобы вовремя выявлять такие несоответствия, необходимо систематически сверять текущее положение объектов строительства с проектными моделями. Для этих целей могут применяться методы лазерного сканирования или методы фотограмметрии.

Методы лазерного сканирования обладают рядом особенностей и отличий от методов фотограмметрии:

- более высокая точность измерения – неоспоримое преимущество над методами фотограмметрии, однако для данной задачи точности фотограмметрических методов будет достаточно;
- для проведения лазерного сканирования нужны специалисты, которые хорошо владеют навыками пользования лазерными сканерами;
- сами сканеры (лидары) имеют высокую стоимость;
- модели, получаемые лидарами, не имеют текстур, что делает такую модель менее «читаемой».

Исходя из этого, было решено попробовать реализовать поставленную задачу методами фотограмметрии, при этом использовать подручные средства фотографирования – мобильный телефон и фотоаппарат.

Опыт проводился на реальном помещении, заставленном техникой и мебелью. Для получения проектной модели этого помещения был создан план этого помещения (рис. 2, слева) и размещения в ней объектов, по которому была построена простая 3D-модель (рис. 2, справа).

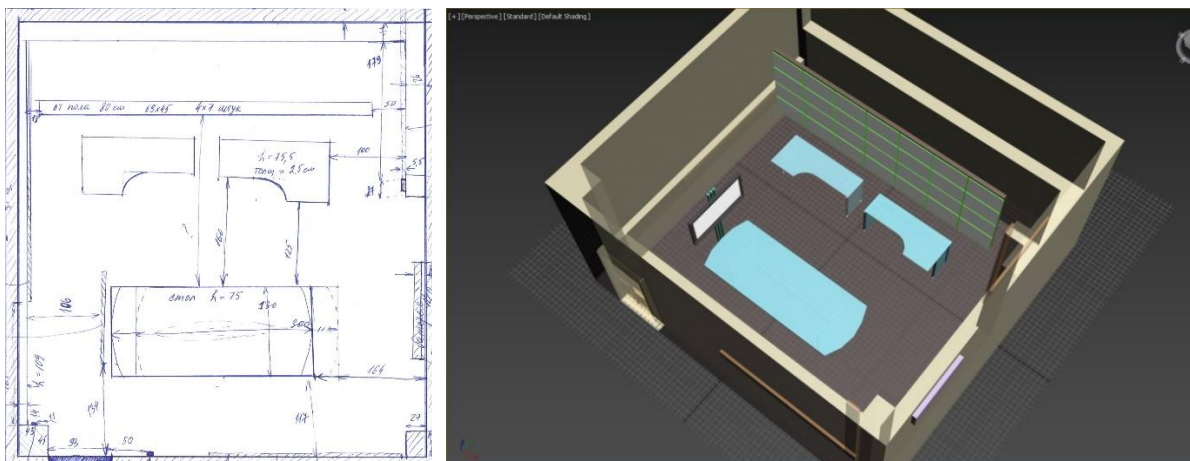


Рис. 2. Проектная модель

3. Основной алгоритм

SfM – structure from motion (структура из движения) – является методом формирования трехмерных структур из двумерного изображения [2]. На вход алгоритма поступают изображения, а на выходе получается грубая трехмерная форма объекта в виде облака точек и восстановленные позиции камер (рис. 3).

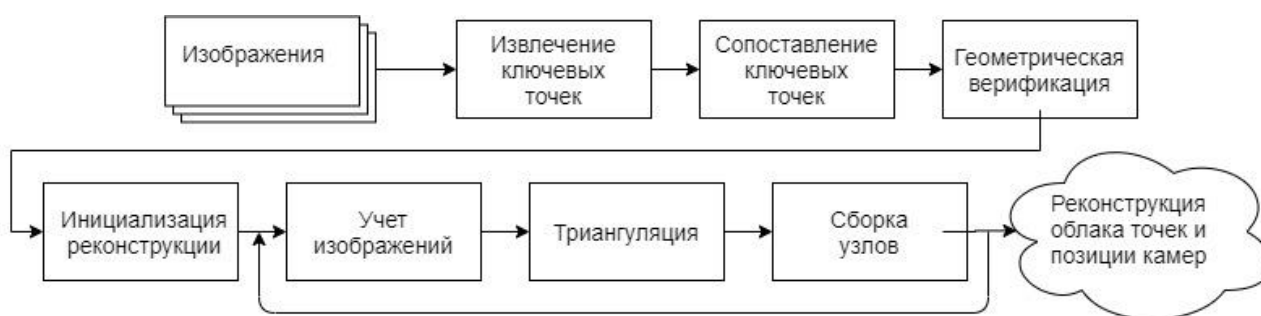


Рис. 3. SfM конвейер

3.1. Извлечение ключевых точек

Для каждого изображения, переданного во входные данные в конвейер, создается набор локальных объектов для описания опорных точек изображения (ключевых точек). Для извлечения признаков могут использоваться различные решения, выбор алгоритма влияет на надежность признаков и эффективность фазы согласования. Наиболее популярный и эффективный из таких алгоритмов – SIFT (scale invariant feature transform). О нем поговорим подробно в разделе 3.8. Как только ключевые точки и их описание получены, можно найти соответствия этих точек на разных изображениях следующим шагом.

3.2. Сопоставление ключевых точек

Ключевые точки и объекты, полученные с помощью функции «Извлечение объектов», используются для определения того, какие изображения представляют общие части сцены и, следовательно, по крайней мере частично имеют перекрытия. Если две точки на разных изображениях имеют одинаковое описание, то эти точки можно рассматривать как одинаковые на сцене по отношению к внешнему виду. Если два изображения имеют общий набор точек, то можно утверждать, что они изображают общую часть сцены. Различные стратегии могут быть использованы для эффективного

вычисления совпадений между изображениями. Результатом этой фазы является набор перекрывающихся изображений и набор соответствий между объектами.

3.3. Геометрическая верификация

Эта фаза анализа необходима, поскольку предыдущая фаза сопоставления только проверяет, что пары изображений, очевидно, имеют общие точки. При этом не гарантируется, что найденные совпадения являются реальными соответствиями трехмерных точек на сцене, ложные совпадения не исключены. Необходимо найти геометрическое преобразование, которое правильно отображает достаточное количество точек, общих для двух изображений. Если это происходит, два изображения считаются геометрически выверенными, что означает, что точки также соответствуют геометрии сцены. В зависимости от пространственной конфигурации, с которой были получены изображения, могут использоваться разные методы для описания их геометрических отношений. Гомография (перспективное преобразование плоскости) может использоваться для описания преобразования между двумя изображениями камеры, которая описывает плоскую (2D) сцену (рис. 4).

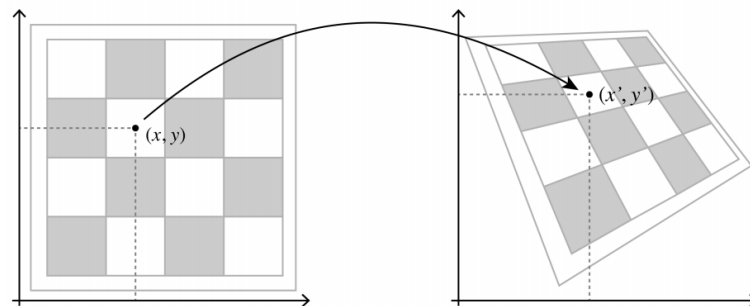


Рис. 4. Гомография

Наряду с ней существует эпполярная геометрия, когда две камеры смотрят на одну 3D-сцену с двух разных положений, то существует ряд геометрических отношений между 3D-точками и их 2D-проекциями. Геометрический смысл показан на рис. 5, он состоит в том, что для каждой точки одного изображения соответствующая ей точка на другом изображении находится на некоторой линии (которая не зависит от истинных трехмерных координат точки).

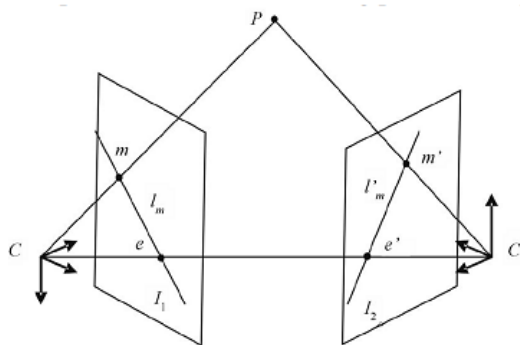


Рис. 5. Эпполярная геометрия:
 C и C' – оптические центры камер

Результатом этой фазы конвейера является так называемый граф сцены, граф, узлы которого представляют изображения, а ребра соединяют пары изображений, которые считаются геометрически выверенными.

3.4. Инициализация реконструкции

Инициализация поэтапной реконструкции является важной фазой, потому что плохая инициализация приводит к плохой реконструкции трехмерной модели. Чтобы получить хорошую реконструкцию, предпочтительно начинать с плотной области графа сцены, чтобы избыточность соответствий обеспечивала прочную основу для реконструкции. В случае если реконструкция начинается с области с малым количеством изображений, процесс настройки набора не имеет достаточной информации для уточнения положения реконструированных поз и точек камеры. Это приводит к накоплению ошибок и плохому конечному результату. Для инициализации реконструкции выбирается пара геометрически выверенных изображений в плотной области графа сцены. Если в качестве отправной точки можно использовать более одной пары изображений, то будет выбрано изображение с наиболее геометрически выверенными совпадающими точками. Точки, общие для двух изображений, используются в качестве первых точек реконструированного облака. Они также используются для установления позы первых двух камер. Впоследствии ступени конвейера «учет изображений», «триангуляция» и «сборка узлов» добавляют итеративно новые точки к реконструкции, рассматривая новое изображение.

3.5. Учет изображений

Учет изображения является первым шагом последовательной реконструкции модели. На этом этапе новое изображение добавляется к реконструкции и, таким образом, идентифицируется как зарегистрированное изображение. Для вновь зарегистрированного изображения необходимо рассчитать позу камеры (положение и поворот), которая его получила. Это может быть достигнуто с использованием соответствия с известными трехмерными точками реконструкции. Следовательно, этот этап использует преимущество 2D-3D соответствия между ключевыми точками вновь добавленного изображения и точками трехмерной реконструкции, которые связаны с ключевыми точками ранее зарегистрированных изображений. Для оценки положения камеры необходимо определить положение в терминах трехмерных координат системы координат эталонного мира и вращения, что в сумме составляет шесть степеней свободы. Часто в двумерных и трехмерных соответствиях присутствуют шумы, упомянутые выше алгоритмы используются для получения надежной оценки положения камеры. Новое записанное изображение еще не способствовало добавлению новых точек, это будет сделано на этапе триангуляции.

3.6. Триангуляция

Предыдущий шаг идентифицирует новое изображение, имеющее точки, общие с трехмерными точками, которые уже были реконструированы ранее. Таким образом, алгоритм находит все новые и новые точки облака. Такие точки могут быть добавлены к трехмерной реконструкции, если они наблюдаются по меньшей мере одним ранее зарегистрированным изображением. Процесс триангуляции используется для определения трехмерных координат новых точек, которые могут быть добавлены к реконструкции, таким образом, создается более плотное облако точек. Задача триангуляции состоит из пары зарегистрированных изображений с общими точками и оценки соответствующих поз камеры. Затем алгоритм пытается оценить трехмерные координаты каждой точки, общей для двух изображений. Чтобы решить проблему триангуляции, устанавливается эпиполярное ограничение. Необходимо, чтобы позиции, из которых были получены изображения, позволяли идентифицировать позицию получения аналога на изображении; эти точки называются эпиполями. В идеальном случае можно использовать эпиполярные линии для определения эпиполярной

плоскости, на которой лежит точка, положение которой должно быть оценено. Возвращаясь к рис. 3: если точка P на первом изображении спроектирована в m , тогда на другом изображении ее проекцию надо искать на прямой I'_m . Однако из-за неточностей в предыдущих фазах конвейера возможно, что точка не лежит в точном пересечении эпиполярных линий. Эта ошибка называется ошибкой перепроектирования. Для решения этой проблемы необходимы специальные алгоритмы, учитывающие неточность.

3.7. Сборка узлов

Последний этап SfM. Поскольку оценка положений камеры и триангуляции может привести к неточностям при реконструкции, необходимо принять метод, позволяющий минимизировать накопление таких ошибок. Целью этой ступени конвейера является предотвращение неточностей в оценке положения камеры в триангуляции облака точек и наоборот. Поэтому сборку узлов можно сформулировать как уточнение реконструкции, которая дает оптимальные значения для 3D реконструированных точек и калибровочных параметров камер. Алгоритм, используемый для этого этапа известен как метод наименьших квадратов для нелинейного случая. Могут применяться различные реализации этого алгоритма. Эта фаза имеет высокую вычислительную стоимость и должна выполняться для каждого изображения, которое добавлено в реконструкцию. Для сокращения времени обработки алгоритм может выполняться только локально (т. е. для небольшого количества камер). Сборка узлов выполняется глобально на всех изображениях только тогда, когда перестроенное облако точек выросло как минимум на определенный процент с момента последнего глобального создания сборки.

3.8. SIFT

В своем исследовании я применяла реализацию SfM-алгоритма в виде SIFT-метода (scale invariant feature transform). Этот метод основан на извлечении и описании ключевых точек.

Алгоритм ищет соответствия между изображениями. Само изображение заменяется набором ключевых точек. Метод извлечения ключевых точек изображения – детектор. Детектор обеспечивает инвариантность нахождения точек относительно преобразования. Deskриптор – идентификатор ключевой точки [3].

Допустим, что мы хотим использовать интенсивность цвета пикселя в изображении в качестве идентификатора точек (рис. 6). Пусть $N(x, y)$ – интенсивность цвета пикселя с координатами (x, y) . Но такое представление не будет инвариантно относительно преобразований изображения.

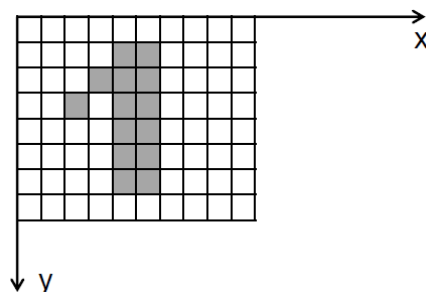


Рис. 6. Интенсивность пикселей

Deskрипторы должны обеспечивать инвариантность нахождения соответствия между особыми точками относительно преобразований изображений. Преобразования,

относительно которых нам нужна инвариантность: смещение, поворот, масштабирование, разная яркость, изменения положения камеры. Один из наиболее популярных методов SfM в части первой ступени конвейера – метод SIFT (scale invariant feature transform).

На изображениях выделяются ключевые точки, уточняются их пригодности и ориентации, а также вычисляются дескрипторы точек. Об этом по порядку.

Главным является построение пирамиды гауссианов (Gaussian) и разностей гауссианов (Difference of Gaussian, DoG). Гауссиан – изображение, размытое гауссовым фильтром:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$$

L – значение гауссиана в точке с координатами (x, y) ,

σ – радиус размытия,

G – гауссово ядро,

I – значение исходного изображения,

$*$ – операция свертки.

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

Разностью гауссианов называют изображение, полученное путем попиксельного вычитания одного гауссиана исходного изображения из гауссиана с другим радиусом размытия:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma)$$

Масштабируемым пространством изображения является набор всевозможных версий исходного изображения. Гауссово масштабируемое пространство является линейным, инвариантным относительно сдвигов, вращений, масштаба, не смещающим локальные экстремумы. Важно, что различная степень размытия изображения гауссовым фильтром может быть принята за исходное изображение, взятое в некотором масштабе. Инвариантность относительно масштаба достигается за счет нахождения ключевых точек для исходного изображения, взятого в разных масштабах. Для этого строится пирамида гауссианов: все масштабируемое пространство разбивается на некоторые участки — октавы, причем часть масштабируемого пространства, занимаемого следующей октавой, в два раза больше части, занимаемой предыдущей. К тому же, при переходе от одной октавы к другой размеры изображения уменьшаются вдвое (рис. 7).

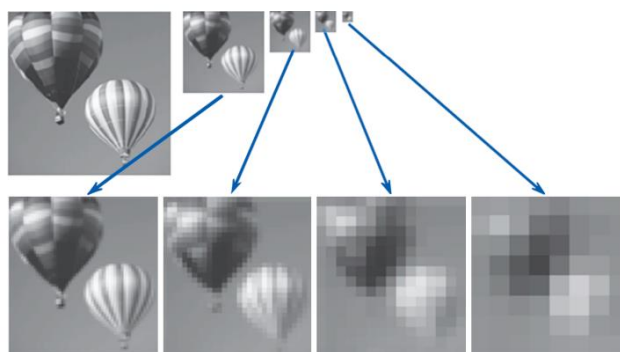


Рис. 7. Алгоритм построения пирамиды гауссианов

Наряду с построением пирамиды гауссианов выполняют построение пирамиды разностей гауссианов, которая состоит из разностей соседних изображений пирамиды гауссианов. Число изображений в этой пирамиде будет равно $N+1$ (рис. 8, справа).

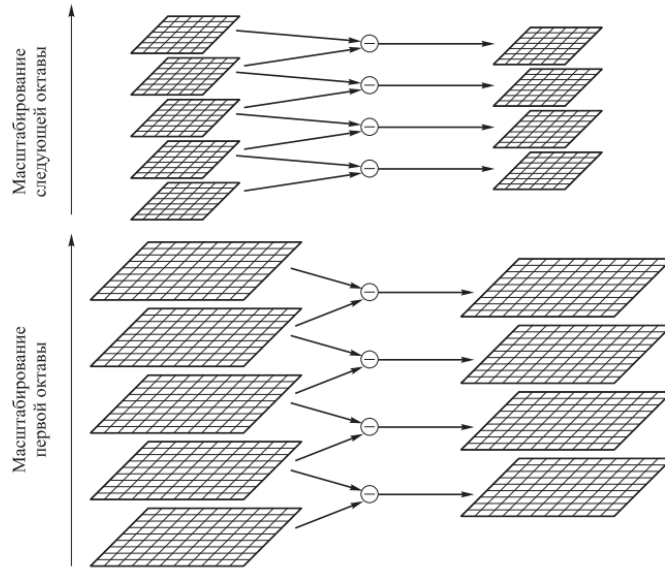


Рис. 8. Пирамида гауссианов и разностей гауссианов

Точка считается особой, если эта точка – локальный экстремум разности гауссианов. Из всей пирамиды DoG для каждого изображения находят точки локального экстремума. Каждая точка изображения сравнивается со своими соседями на других уровнях пирамиды. Если эта точка больше (меньше) всех своих соседей – она и есть локальный экстремум.

После нахождения особой точки, нужно провести уточнение ее пригодности на роль ключевой. Для этого функцию DoG аппроксимируют многочленом Тейлора 2-го порядка в точке вычисленного экстремума.

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial^2 X^2} X$$

D – функция DoG,

$X = X(x, y, \sigma)$ – вектор смещения относительно точки разложения.

Вычисление экстремума находится при помощи взятия производной многочлена Тейлора и приравнивания его к нулю. Смещение точки вычисленного экстремума относительно точного экстремума:

$$\hat{X} = -\frac{\partial^2 D^{-1} \partial D}{\partial X^2 \partial X}$$

Для вычисления производных используется метод конечных разностей. Получается СЛАУ 3x3 относительно компонент $\hat{X}$. Условие, при котором точка экстремума была найдена неточно (неверно): если одна из компонент вектора $\hat{X}$ больше на половину шага сетки в этом направлении. После чего необходимо сдвинуться к соседней точке в направлении этих компонент. Если после повторения такой процедуры мы выйдем за границы октавы – данная точка исключается из рассмотрения.

Другая проверка точки – проверка ее на малость, когда вычисляется само значение DoG ($\hat{X}$). И еще одна проверка точки на ее нахождение на границе или в плохом освещении. Для проверки используется матрица Гессе $H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix}$, а также след матрицы $Tr(H)$ и определитель матрицы $Det(H)$.

Если точка прошла все проверки – она является ключевой. Для нее нужно вычислить ориентацию. Направление ключевой точки вычисляется исходя

из направлений градиентов точек, соседних с особой. Все вычисления градиентов производятся на изображении в пирамиде гауссианов, с масштабом наиболее близким к масштабу ключевой точки. Подробнее об этом можно найти в источнике [4].

Переходим к дескрипторам. В нашем случае дескриптором является некая информация об окрестности ключевой точки. В методе SIFT дескриптором является вектор. Как и направление ключевой точки, дескриптор вычисляется на гауссиане, ближайшем по масштабу к ключевой точке, и исходя из градиентов в некотором окне ключевой точки. Перед вычислением дескриптора это окно поворачивают на угол направления ключевой точки, чем и достигается инвариантность относительно поворота. На рисунке 9 показана схема получения дескриптора из изображения. Слева мы видим пиксели – 64 небольших квадрата, в центре каждого из которых стрелочка, которая является градиентом данного пикселя. На этом же рисунке слева все пиксели поделены на 4 региона, выделенные более жирной зеленой линией. Синий круг – окно свертки с гауссовым ядром (для этого ядра определен радиус размытия σ , равный половине ширины окна дескриптора). В дальнейшем значение каждой точки окна дескриптора будет домножаться на значение гауссова ядра в этой точке, как на весовой коэффициент. Справа видим схематически изображенный дескриптор особой точки, размерности $2 \times 2 \times 8$. 2×2 – количество регионов, 8 – количество компонент внутри региона. Гистограммы в регионах вычисляются так же, как и гистограмма направлений с оговорками: каждая гистограмма так же покрывает участок в 360 градусов, но делит его на 8 частей; в качестве весового коэффициента берется значение гауссова ядра, общего для всего дескриптора; в качестве еще одних весовых коэффициентов берутся коэффициенты трилинейной интерполяции.

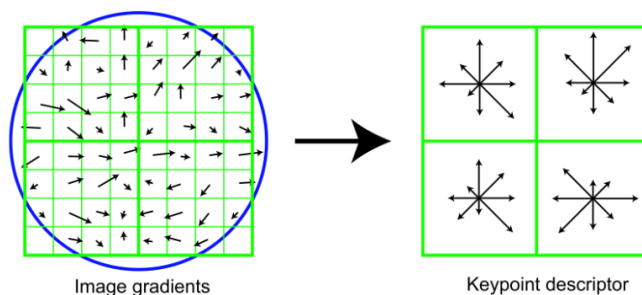


Рис. 9. Градиент изображения (слева) и дескриптор ключевых точек на его основе (справа)

Дескриптор ключевой точки состоит из всех полученных гистограмм. На практике используются дескрипторы размерности 128 компонент ($4 \times 4 \times 8$). Полученный дескриптор нормализуется. В таком виде дескрипторы готовы к использованию.

Сравнивая дескрипторы, можно найти соответствующие друг другу точки на разных изображениях. Если дескрипторы точек на разных изображениях близки, то можно считать, что один и тот же физический объект. Поиск соответствий сводится к обходу всех ключевых точек одного изображения и поиску наиболее близкого дескриптора на другом изображении. При любом качестве дескриптора ложных соответствий будет много. Их нужно отфильтровать. Самая сильная фильтрация — это использование эпиполярного ограничения, о чем было упоминание в пункте 2.3.

Остальные ступени конвейера более подробно рассматриваться не будут в рамках данной статьи, их математический аппарат хорошо описан в [4].

4. Результаты применения алгоритма

Теперь рассмотрим на конкретном примере работу алгоритма создания трехмерной модели из набора фотографий.

4.1. Проведение съемки

При проведении съемки важно соблюдать нижеописанные правила:

- Камера должна иметь высокое разрешение (8 и более МПикс).
- Фокусное расстояние должно входить в границы от 20 до 80 мм. Рекомендуется фиксировать фокусное расстояние, для техники с его регулировкой.
- Формат данных RAW, сконвертированный в TIFF, предпочтительней, из-за меньших шумов. Но допустим и формат данных JPG.
- Необходимо установить минимально возможное значение ISO.
- Для достижения максимальной глубины резкости проводить съемку с минимальным диаметром диафрагмы.
- Снимки должны быть четкими, избегайте размытия изображений и съемку движущейся камерой. Не рекомендуется длинная выдержка.
- Количество фотографий для одного помещения 100–300. Избыток фотографий лучше, чем их недостаток.
- Широкоугольные объективы дают больше информации, чем телеобъективы. Полученные с их помощью фотографии лучше подходят для нахождения соответствий между объектами на разных кадрах.
- При съемке избегайте плоских нетекстурированных, отражающих и прозрачных объектов.
- Избегайте попадания в кадр нежелательных объектов. Не допускайте изменения взаимного расположения объектов в процессе съемки.
- Делайте снимки с большим перекрытием около 60–80%;
- Важно фотографировать детали с разных ракурсов.
- Для привязки восстановленной трехмерной модели в относительной системе координат, необходимо запомнить или разместить в пределах сцены наземные маркеры, по которым будет построена относительная система координат и восстановлен масштаб.
- Обработка фотографий запрещена.
- Возможно реконструировать только те точки сцены, которые видны не менее чем на двух кадрах, поэтому минимизируйте количество «слепых» зон.
- Допускается съемка объекта по частям, при условии достаточного перекрытия кадров. Не обязательно помещать объект целиком в каждый кадр.
- Применение хорошего освещения увеличит качество результата съемки. Однако необходимо избегать бликов. Источники освещения рекомендуется располагать за пределами кадра. Лучше не использовать вспышку.
- В случае если исходные изображения не имеют EXIF данных или EXIF данных недостаточно для расчета фокусного расстояния в пикселях, то необходимо указать фокусное расстояние (мм) и размер пикселя сенсора (мм).

На рисунках 10–12 даны рекомендации для сценариев съемки.



Рис. 10. Сценарий проведения съемки плоского объекта

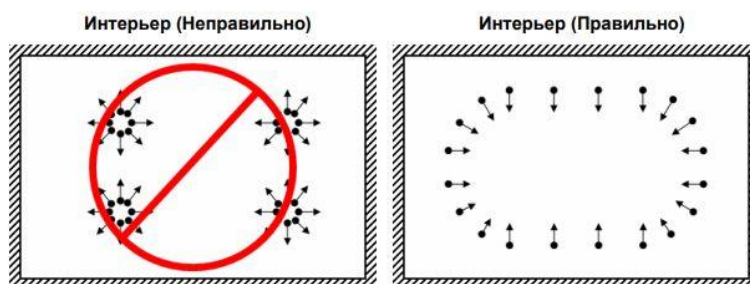


Рис. 11. Сценарий проведения съемки интерьера

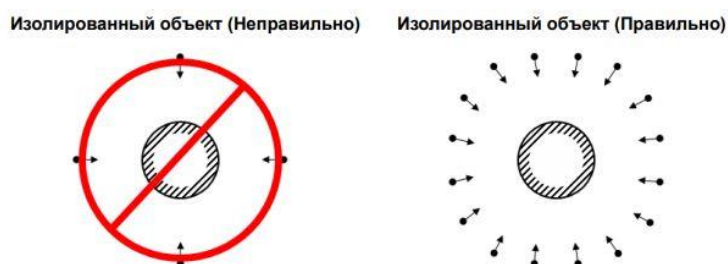


Рис. 12. Сценарий проведения съемки изолированного объекта

На основании вышеописанных правил была проведена фотосъемка реального помещения, которое обставлено оборудованием, мебелью, техникой и пр.

4.2. Выравнивание фотографий и создание облака точек

Это первый пункт алгоритма. Все фотографии загружаются в программу и запускаются на выравнивание и получение положений камер (рис. 13). Если вместе со снимками нет EXIF-файлов данных камеры, то необходимо вручную задать эти значения.

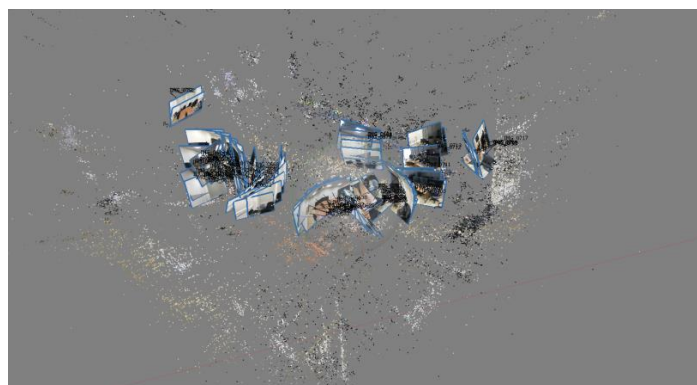


Рис. 13. Связующие точки и камеры

4.3. Генерирование плотного облака точек

Основываясь на рассчитанных положениях камер, вычисляется карта глубины каждой камеры. На этой основе строится плотное облако точек (рис. 14). Если данных достаточно, то облако точек получается даже плотнее, чем созданное с помощью лазерного сканера. В целом уже на этом этапе получается понятная модель, которую можно использовать для сравнения с моделью проекта. При этом важно правильно выставить параметры реконструкции, такие как фильтрация карт глубины. При ее отсутствии возникает большое количество шумов, а при слишком сильной фильтрации – теряется часть точек.

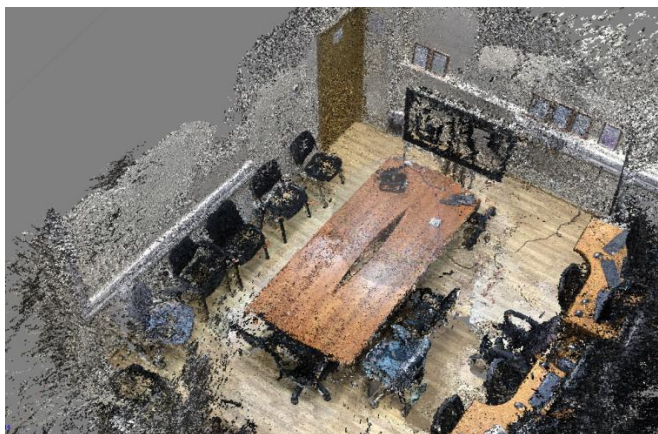


Рис. 14. Плотное облако точек

4.4. Построение трехмерной полигональной модели

Произвольный тип поверхности может быть использован для моделирования объектов любого вида. Этот тип следует выбирать для реконструкции замкнутых поверхностей, таких как статуи, здания и т. д. Соответствующие методы реконструкции не подразумевают никаких ограничений на тип моделируемого объекта, что достигается за счет использования большего количества ресурсов памяти. Для построения полигональной модели ландшафтов и при обработке результатов аэрофотосъемки эти поверхности не подходят.

Исходными данными для данного этапа является плотное либо разреженное облако. Но, как мы понимаем, плотное облако предпочтительнее. Кроме того, можно варьировать число полигонов. Слишком маленькое число полигонов ведет к построению грубой модели, тогда как слишком большое их число (более 10 миллионов полигонов) скорее всего, создаст сложности при визуализации модели во внешних программах.

Желательно использовать интерполяцию (рис. 15 слева) для заполнения пустот автоматически. Экстраполяцию я бы не рекомендовала использовать. При отсутствии того и другого результат тоже получится, но выглядеть будет как на рис. 15 справа.

Создать полигональную модель с первого раза, даже на основе самого качественного плотного облака точек, практически невозможно.

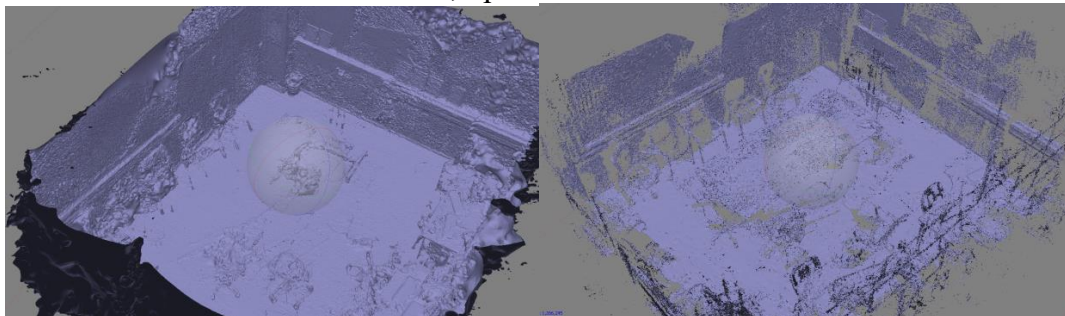


Рис. 15. Построение интерполированной модели (слева) и неинтерполированной (справа)

4.5. Наложение текстур

Для повышения качества текстуры, рекомендуется исключить изображения плохого качества из обработки на данном этапе. После наложения текстур из модели на рисунке 15, получаем модель на рис. 16.

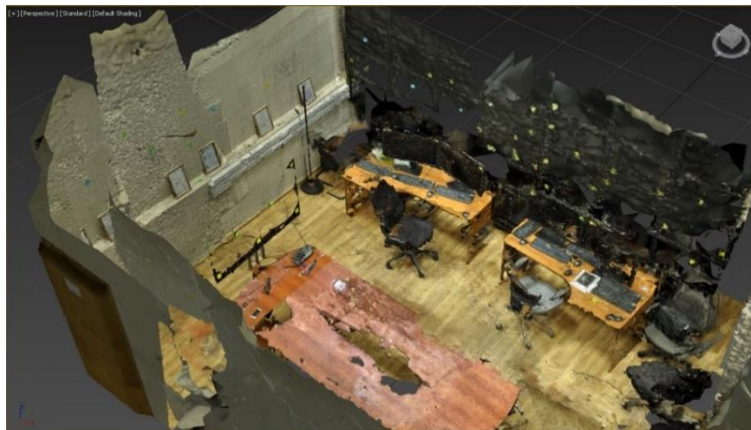


Рис. 16. Готовая текстурированная модель

5. Сравнение полученных моделей с проектными

Модель, полученная в предыдущем параграфе (рис. 16), основана на реальных снимках помещения. У этого же помещения есть проектная 3D-модель (рис. 2). Чтобы увидеть расхождения (расположения мебели, оборудования, техники) внутри этого помещения, наложим друг на друга две модели (рис. 17).

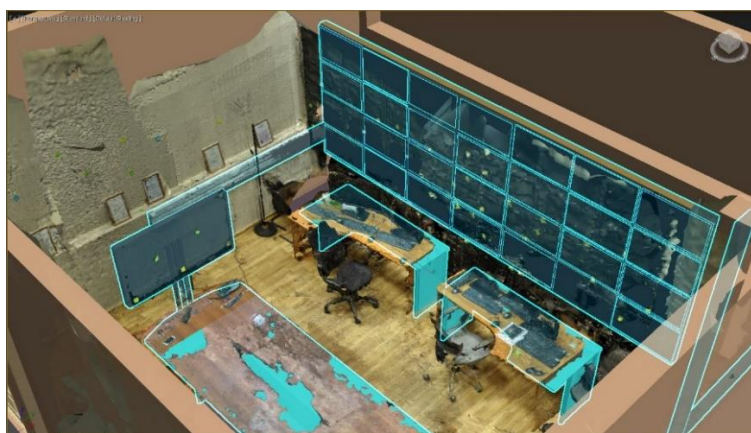


Рис. 17. Наложение моделей

Используя встроенные инструменты ПО можно измерить расстояние, угол отклонения реальной модели и проектной.

Заключение

По результатам анализа полученных в ходе работы материалов можно сделать вывод, что данная методика применима для цифрового сопровождения монтажа оборудования, кроме этого, может быть применима для контроля строительства. Она позволяет быстро дать оценку текущему положению этапа стройки, используя при этом небольшие человеческие ресурсы. Решение является достаточно экономичным, в сравнении с лазерным лидаром. Точность такого подхода ниже, чем у лазерного сканера, но достаточная для данной задачи.

Список литературы

1. Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия. – М.: УПП «Репрография» МИИГАиК, 2008. – 160 с.
2. Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines / S. Bianco, G. Ciocca, D. Marelli // Journal of Imaging, Switzerland, 2018. 18 с.
3. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / David G. Lowe // Computer Science Department University of British Columbia, Canada, 2004. 28 с.
4. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.