

Цифровая камера как практический геодезический инструмент: проблемы и решения

Джарроуш Д. (Jad Jarroush), Ph.D. в картографии и инженерной геоинформатике,
технический директор Datumate (Израиль)

Рассказывается о практическом использовании современных цифровых камер как геодезического измерительного инструмента. В качестве основной технологии предлагается наземная фотограмметрия, позволяющая определять геометрические свойства объектов по фотографическим изображениям. Особое внимание уделяется решению проблем наземной фотограмметрии: калибровка фотокамер и последующая обработка изображений. Для подтверждения работоспособности данного подхода приводится описание полевых испытаний и полученных в их ходе результатов.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается крупный технологический прогресс в области цифровой фотографии. Прогресс привёл к значительному улучшению качества цифровых камер и увеличению на порядок разрешения изображений. На данный момент повышение качества цифровой фотографии сочетается со значительным уменьшением цен на цифровые фотокамеры. В результате геодезисты впервые получили возможность применять цифровые фотокамеры в качестве практического геодезического измерительного инструмента. Ежедневное использование цифровых камер для геодезических измерений может привести к беспрецедентному повышению производительности геодезических полевых групп. К сожалению, использование цифровой фотографии в качестве обычного инструмента для геодезических измерений имеет ряд ключевых геодезических и практических трудностей.

Задачи фотограмметрии можно разделить на несколько категорий. Первая категория — это задачи, связанные с тем, что преломление света в цифровой камере и внутри ПЗС-сенсора не является совершенным и приводит к различным искажениям изображения. Процесс калибровки камер необходим для оценки искажения изо-

бражений и применения внутренней коррекции относительной позиции пикселей в ПЗС-сенсоре. Вторая категория — это математические задачи из области наземной фотограмметрии. В отличие от аэрофотограмметрии, когда небольшое количество изображений может охватить большую площадь, фотографирование с уровня земли затруднено из-за местных препятствий. Поэтому фотограмметрия с уровня земли обычно требует относительно большого числа изображений для полного покрытия области измерений. Это затрудняет работу геодезистов. Простой способ решения этой проблемы — использовать цифровую камеру выше уровня глаз фотографа с помощью штатива и пульта дистанционного управления. Это позволит уменьшить количество изображений, необходимых для покрытия области измерений. Измерение координат точки с изображений требует точной оцифровки пикселя на хотя бы трёх изображениях. Два изображения необходимы для расчёта координат, третье изображение — для контроля качества. Однако ручная оцифровка пикселя на трёх различных изображениях может привести к ошибкам, особенно если пиксель находится на одноцветной поверхности.

Эти проблемы увеличивают сложность использования наземной фотограмметрии в качестве

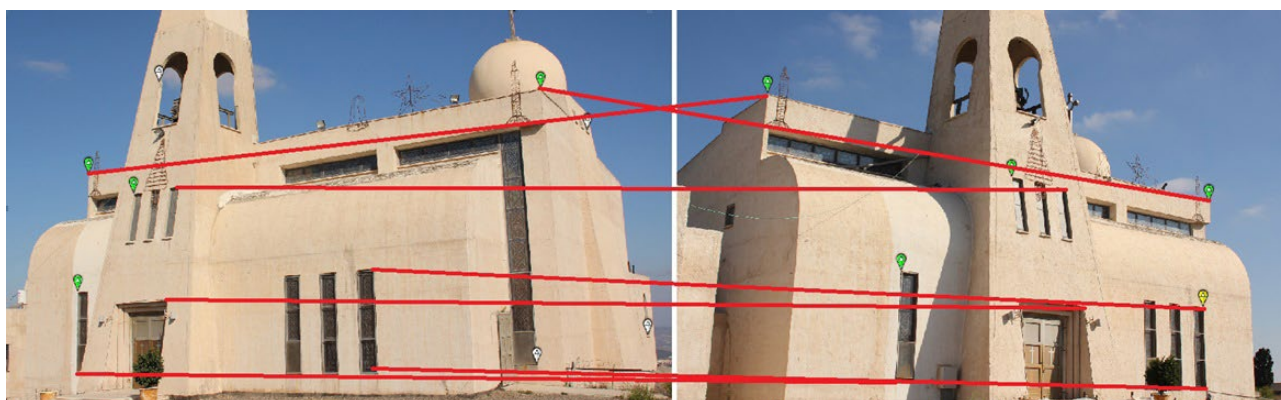


Рис. 1. Увязка пары изображений (красные линии связывают точки привязки)

инструмента для ежедневной работы геодезистов. К счастью, существуют различные решения этих проблем.

Наземная фотограмметрия

Наземная фотограмметрия занимается измерением координат с изображений, сделанных на уровне земли. Использование соответствующего программного обеспечения для наземной фотограмметрии превращает экран компьютера в высокоточный инструмент наподобие теодолита. Координаты точек на цифровых изображениях заменяют горизонтальные азимуты и углы наклона. Однако в отличие от теодолита обычно трудно определить точную позицию камеры, её ориентацию или уровень. Более того, на изображении показывается только небольшой сегмент пространства вокруг камеры. Таким образом, определение точного расположения и ориентации камеры должно основываться на хорошо известных контрольных точках по всей области измерения. Этот процесс задействует обратное пересечение линий видимости в пространстве.

Наземная фотограмметрия имеет несколько ключевых преимуществ. Например, в случае возникновения сомнений, фотограмметрические измерения и расчёты координат можно выполнять, контролировать и проверять с помощью независимых групп. Измерения можно выполнить даже через несколько лет после фотографирования местности. Это может иметь важное значение при реконструкции архитектурных и исторических объектов.

Обработка изображений для решения проблем наземной фотограмметрии

Многочисленные научные и коммерческие пакеты программного обеспечения для наземной фотограмметрии предлагают функции расчёта пространственных координат пикселя на изображении на основе выбора дополнительных изображений. Большинство пакетов программного обеспечения слишком сложны для ежедневного

использования и требуют значительных усилий для создания геодезического вывода в виде подробной карты фасада, топографической или аэрографической карты, трёхмерной модели здания и т.д. Как описано выше в первом разделе, большинство проблем использования возникают из-за того, что (а) требуется несколько изображений для покрытия области измерения из-за препятствий на местности; (б) необходимо выбрать один пиксель на нескольких изображе-

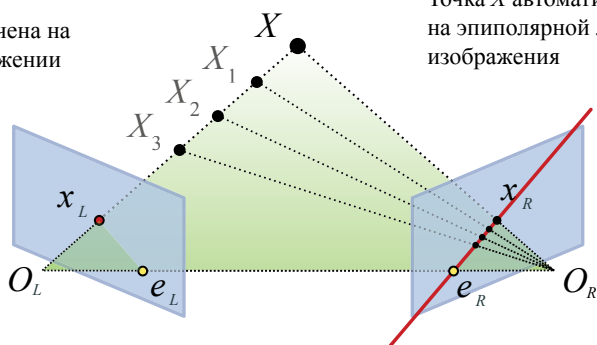
Наземная фотограмметрия имеет несколько ключевых преимуществ. Например, в случае возникновения сомнений, фотограмметрические измерения и расчёты координат можно выполнять, контролировать и проверять с помощью независимых групп. Измерения можно выполнить даже через несколько лет после фотографирования местности.

ниях, чтобы фотограмметрическая модель могла генерировать пространственное положение точки на местной или государственной сети. Для оценки масштаба практических проблем необходимо учесть, что фотограмметрическое решение системы изображений осуществляется одним из двух следующих методов.

Первый метод требует точного выбора хотя бы четырёх контрольных точек на каждом изображении с известными пространственными координатами. Это позволяет определить внешнюю ориентацию камеры при фотографировании изображений, а также относительную ориентацию изображений.

Второй метод связывает каждую пару изображений с помощью выбора нескольких точек привязки. Обычно используется шесть точек. Необходимо удостовериться, что эти точки расположены на области совмещения изображений (рис. 1). После связывания каждой пары изображений так, чтобы каждое изображение было связано хотя бы с одним изображением (желательно

Точка X помечена на левом изображении



Точка X автоматически найдена на эпиллярной линии правого изображения

Рис. 2. Красная линия на правом изображении означает эпиллярную линию (линию совмещения изображений) точки X , выбранной на левом изображении

больше), можно вычислить относительную ориентацию изображений. Выбор хотя бы четырёх известных контрольных точек на системе изображений (необязательно на одном изображении) может связать фотограмметрическую модель с координатами системы местной или государственной сети и вычислить внешнюю ориентацию всех изображений.

Любой из этих методов можно использовать для вычисления точки на местной или государственной сети после выбора хотя бы двух изображений. На основе геометрических принципов можно показать, что эллипс ошибок позиции точки уменьшается в размере при приближении угла пересекающихся направлений изображений к 90° и является функцией $1/\sin\alpha$ (рис. 2).

Однако из-за существования нескольких изображений для фотограмметрической привязки изображений необходимо выбрать хотя бы четыре известные контрольные точки на каждом изображении (первый метод выше) или выбрать хотя бы шесть точек привязки для каждой пары изображений (второй метод выше). Очевидно, что ручное выполнение

этой работы очень утомительно для геодезиста. Этот процесс не может заменять существующие методы вычисления координат в поле.

Кроме того, требуется дополнительная работа для точного выбора каждой точки на хотя бы трёх изображениях (третье изображение необходимо для контроля качества). Очевидно, что необходимо упростить этот процесс. К счастью, можно вычислить эпиллярную линию данной точки на любом изображении из пары изображений (рис. 3). Эпиллярная линия создаётся пересечением пространственных векторов между двумя точками O_L и O_R при известной ориентации изображений. После нанесения на втором изображении эпиллярной линии выбранной точки, понятно, что точка должна находиться на эпиллярной линии второго изображения. Нанесение эпиллярной линии может помочь пользователю быстрее найти точку на другом изображении.

Пример такого использования эпиллярной линии показан ниже на рисунке 3. Очевидно, что даже эта более короткая процедура всё ещё является трудоёмкой. Не так просто её приме-

нять к вычислению сотен или тысяч точек на многочисленных изображениях.

Решение проблем, возникающих из-за большого количества изображений и выбранных точек, обеспечивает программное обеспечение для наземной фотограмметрии. Программное обеспечение использует алгоритм автоматической обработки изображений, который а) автоматически находит гомологические точки (точки, совпадающие при наложении фигур) привязки между любой парой изображений и их относительную ориентацию; б) автоматически находит выбранную точку на одном изображении среди всех изображений, где она появляется. Таким образом, программное обеспечение для наземной фотограмметрии может преодолеть ключевые проблемы, которые мешают геодезистам использовать наземную фотограмметрию. Есть две задачи, которые можно решить с помощью такого алгоритма автоматической обработки изображений:

■ При заданной паре изображений на общей области совмещения алгоритм должен автоматически найти хотя бы

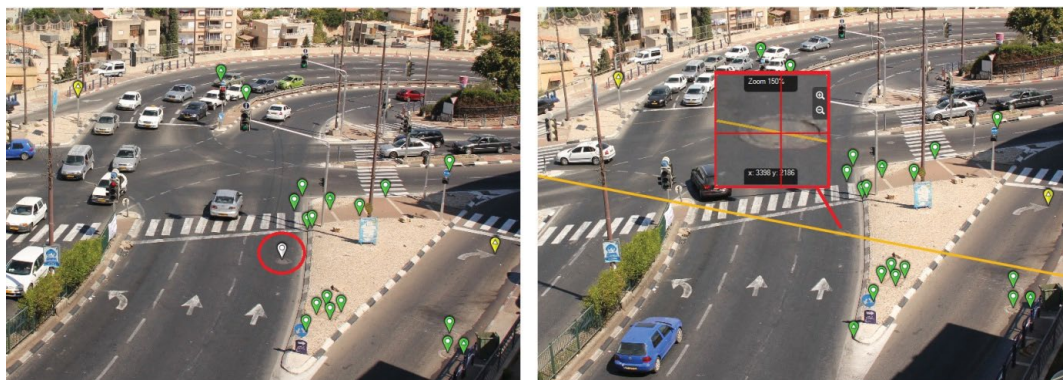


Рис. 3. Применение эпиллярной линии к точке на паре изображений с известной относительной ориентацией. Выбранная точка на левом изображении (белая метка) создаёт эпиллярную линию на правом изображении (жёлтая линия). Выбранная точка расположена на эпиллярной линии (красный крест)

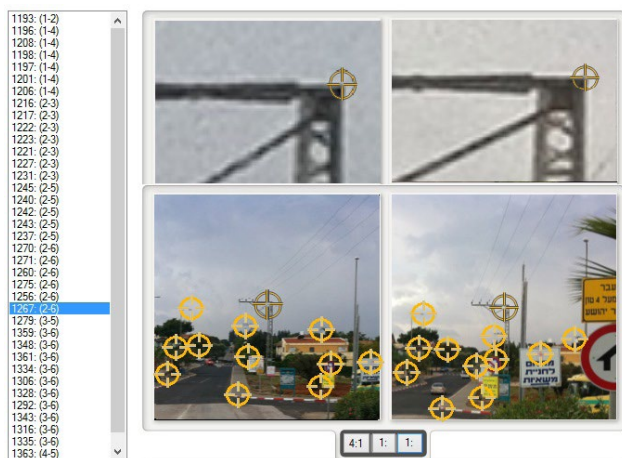


Рис. 4. Пример автоматического нахождения точек привязки на паре изображений и связывания изображений

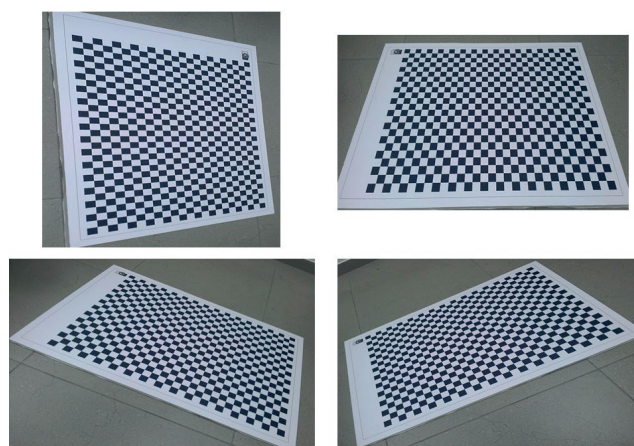


Рис. 5. Пример четырёх калибровочных изображений, использующих метод калибровки «Шахматное поле»

шесть точек привязки, которые разграничивают область совмещения. Для этого алгоритм использует метод обработки изображения, который идентифицирует гомологические точки привязки на паре изображений. На рисунке 4 показан пример автоматической работы пакета программного обеспечения DatuGram3D для наземной фотограмметрии.

■ При заданном количестве изображений, которые покрывают определённую область, алгоритм может автоматически находить конкретные точки на всех изображениях после выбора точки на одном изображении. Таким образом, процесс выбора новых точек на изображениях становится короче в разы, так как точка выбирается только на одном изображении. Эта автоматическая функция применяется в пакете программного обеспечения DatuGram3D для наземной фотограмметрии.

В целом, после реализации и проверки многочисленных алгоритмов для двух указанных выше задач можно сделать вывод, что чем больше общая область совмещения на каждой паре изображений и меньше относительная внешняя ориентация изображений, тем успешнее работает алгоритм и выше точность решения.

Методы калибровки: превращение цифровой камеры в инструмент для точных геодезических вычислений

Существуют различные методы калибровки цифровой камеры.

Например, нахождение параметров внутренней ориентации превращает камеру в точный геодезический измерительный инструмент. Некоторые из этих методов: «Поле калибровки», «Нивелирная рейка» и «Шахматное поле». Первый метод является классическим способом калибровки камеры, имеющим несколько практических проблем, которые препятствуют использованию этого метода геодезистами. Второй и третий методы являются вариантами классического метода «Поле калибровки» и предлагают более практичную процедуру.

Метод калибровки «Шахматное поле»

В методе калибровки «Шахматное поле» в качестве поля калибровки используется квадратная сетка с закрашкой в виде шахматного поля. Для обеспечения решения формул метода коллинеарных линий необходимо убедиться, что шахматное поле покрывает всю область снимков. Для процесса калибровки требуется 3–4 изображения различных углов шахматного поля (рис. 5).

Метод калибровки «Шахматное поле» имеет несколько значительных преимуществ.

1. Поле калибровки является лёгким, портативным и доступно для калибровки в любое время. Калибровка не требует специального места и может быть выполнена в офисе.

2. Размер поля калибровки хорошо известен заранее, нет необходимости выполнять трудоёмкие измерения в поле.

3. Алгоритмы обработки изображений можно использовать для автоматической идентификации углов прямоугольников на шахматном поле. Это позволяет полностью автоматизировать процесс калибровки. Качество автоматических измерений может достигнуть субпиксельной точности, предоставляя намного лучшую точность, чем любое ручное измерение.

Метод калибровки «Шахматное поле» обладает явными преимуществами для геодезистов, но имеет некоторые недостатки.

1. Нет никакой гарантии, что шахматное поле действительно будет полностью плоским, как предполагается процедурой калибровки. Шахматное поле должно быть сделано из жёсткого материала, чтобы оно оставалось плоским в течение всей процедуры калибровки.

2. Параметры внутренней ориентации системы камеры при фотографировании с близкого расстояния могут отличаться от параметров расстояния выполнения фотограмметрических измерений в поле. Причиной этого является необходимость нахождения поблизости от цели шахматного поля, чтобы полностью охватить калибровочные изображения. Обычный 24-миллиметровый фокус на бесконечности обычно достигается с расстояния больше двух метров. Если шахматное поле слишком мало, то фокус камеры не будет установлен на бесконечности, а параметры калибровки будут существенно отличаться от параметров системы камеры в области измерения. Для решения этой проблемы

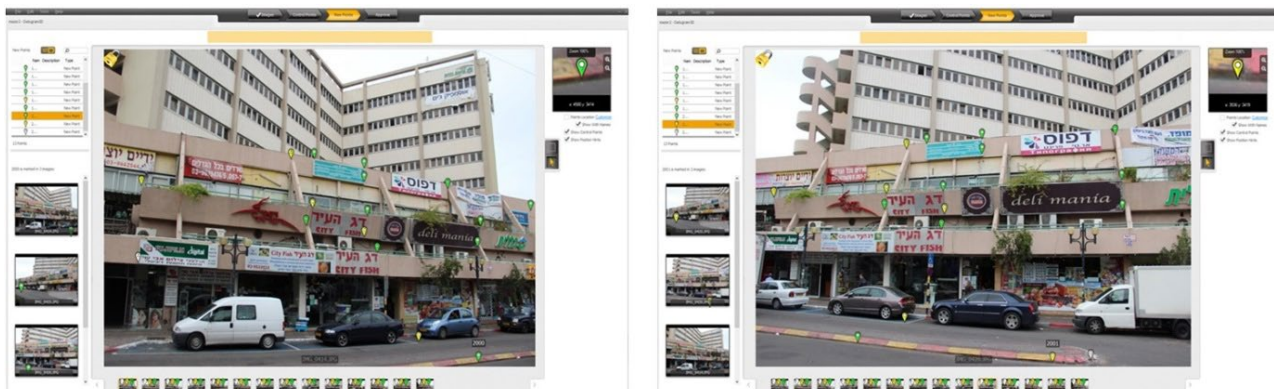


Рис. 6. Пример проекта геодезической съёмки фасада здания, который применялся для проверки фотограмметрической модели

необходимо использовать достаточно большое шахматное поле, чтобы обеспечить одновременное покрытие всей области изображения и установку фокуса камеры на бесконечности.

3. Кроме того, при фотографировании с близкого расстояния недостаточная глубина резкости не может предоставить резкое и сфокусированное изображение всего шахматного поля на наклонном изображении.

Вышеупомянутые проблемы можно решить с помощью использования как можно большего шахматного поля, сделанного из жёсткого материала, и использования идеально плоской поверхности. Для минимизации элементов матрицы параметров внутренней ориентации системы камеры рекомендуется увеличить количество шахматных клеток, а также использовать большее количество калибровочных снимков.

Полевые испытания

Было проведено множество полевых испытаний с различными настройками для проверки качества результатов и точности координат, полученных с помощью фотограмметрической модели. В полевых испытаниях позиции объектов были измерены с помощью тахеометра на уровне точности 3" при измерении азимута и 5 мм уровня точности на расстоянии измерения до 250 м без призмы. Это означает, что можно измерять координаты с помощью этого инструмента относительно позиции инструмента с точностью 5–10 мм, если измерения производятся с расстояния 70–80 м.

На рисунке 6 представлен проект геодезической съёмки дороги, который применялся для проверки фотограмметрической модели. В ходе полевых испытаний использовался тахеометр, чтобы измерить положения контрольных точек для закрепления изображений, а также положения точек, которые использовались для сравнения и проверки точности фотограмметрических измерений. Проект был обработан с помощью фотограмметрического пакета программного обеспечения Datumate DatuGram 3D.

Координаты точек, которые были измерены тахеометром, сравнили с координатами, измеренными фотограмметрическим методом. Результаты испытаний показывают разницу не более 10–25 мм между позициями точек и 3–15 мм между высотой точек. Это доказывает возможность широкого использования наземной фотограмметрии при проведении инженерно-геодезических изысканий.

Заключение

Использование наземной фотограмметрии даёт геодезистам множество потенциальных преимуществ, включая следующие:

- трёхкратное увеличение производительности полевых групп;
- не нужно создавать сложные эскизы полевых участков, так как измерения выполняются прямо на изображениях;
- уникальные методы контроля качества измерений: просмотр и исправление измерений при необходимости;
- возможность выполнения дополнительных измерений без возвращения в поле.

В будущем, по мнению автора, когда алгоритмы автоматической обработки изображений смогут более надёжно автоматически определять положение большинства пикселей данного изображения среди остальных изображений, тогда технология наземной фотограмметрии сможет предоставить достойную альтернативу технологии LIDAR с уровнем точности 1–2 см в 3D.

В любом случае, геодезисты уже сегодня могут использовать технологию наземной фотограмметрии при проведении инженерно-геодезических изысканий. ■