



Рис. 1. Схема размещения лазерных отвесов 1 и мишеней 2.

Стоит отметить, что негативное влияние на данные, полученные от мишеней на компьютер VMT, влияет избыточная влажность в стволе, по причине чего лазерный пучок рассеивается, что приводит к получению ошибочных результатов. Если полученные данные совпадают, то проверяют правильность ввода этих координат в компьютер VMT. В противном случае, проверяют правильность работы лазерной установки. Далее вычисляют поправки в двусосный инклинометр через, предварительно определенный по двум горизонтальным осям, фактический уклон палубы SBR.

Если после всех вышеперечисленных действий проблема не исчезнет, то по результатам нескольких фактических маркшейдерских съёмок стенок забоя определяют направление отклонения SBR и поправками в инклинометр добиваются соответствия данных.

УДК 629.735

## **ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ – ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ**

Е.И. Радцевич, В.А. Колосёнок  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь, [radtsevich.elizaveta@gmail.com](mailto:radtsevich.elizaveta@gmail.com)

Обобщены некоторые важные аспекты автоматической фотограмметрической реконструкции поверхности. Современные фотограмметрические методы, такие как построение конструкции из движения, позволяют полностью автоматизировать

ориентацию практически любых групп изображений с одновременной калибровкой используемой камеры. Из-за широкого использования соответствующих программных решений и плохо документированных алгоритмов, вопрос о том, какое качество измерений может быть достигнуто с помощью этих подходов, часто остается открытым. Кроме того, многие пользователи не осведомлены о влиянии конфигурации съемки на качество калибровки камеры и о том, как это, в свою очередь, влияет на конечный результат.

**Ключевые слова:** калибровка камеры; внутреннее ориентирование; внешнее ориентирование; плотное облако точек; полуглобальное отождествление.

Более трех десятилетий фотограмметрия интенсивно работает над исследованиями и разработкой, основанных на изображениях методов трехмерной реконструкции поверхностей. Долгое время основное внимание уделялось получению цифровых моделей местности по аэрофотоснимкам. В последующий период фотограмметрические методы все больше отошли на второй план, поскольку стали доступны авиационные и наземные системы лазерного сканирования, которые имели многочисленные преимущества перед методами, основанными на изображениях, благодаря прямому получению облаков точек.

Разработки в области компьютерного зрения, постоянно увеличивающаяся вычислительная мощность процессоров и компьютеров, а также резкое развитие недорогих и высокопроизводительных цифровых сенсоров привели к значительному прогрессу в анализе трехмерных изображений и открыли множество новых областей применения. Сегодня доступны методы и системы, которые позволяют полностью автоматизировать ориентацию практически любых групп изображений, генерировать плотные облака точек. Облака точек представляют собой основу для 3D-моделирования, карт и планов или ортофотопланов.

Благодаря профессиональным программным решениям, таким как Pix4Dmapper (Pix4D), PhotoScan (Agisoft) или RealityCapture (Capturing Reality), а также многочисленным решениям с открытым исходным кодом, теперь стало возможным использовать фотограмметрические методы для всех, например, для приложений БПЛА, мобильных платформ.

Калибровка камеры. Как правило, в большинстве случаев на практике используются цифровые камеры, не предназначенные специально для фотограмметрии. Поэтому их необходимо постоянно калибровать, поскольку нельзя предполагать долговременную стабильность механических и оптических компонентов, как в случае со специальными метрическими камерами.

Задача калибровки камеры – определить параметры внутренней ориентации с качеством, адекватным для последующего применения. Это включает в себя точность параметров математической модели камеры из аналитического расчета, достоверность этих параметров до и в течение периода получения изображения и числовую независимость параметров от других переменных, в частности параметров внешней ориентации. Поскольку достижимая точность измерения в пространстве объекта всегда зависит от текущего масштаба изображения в фотограмметрии, необходимо стремиться к чрезвычайно малой погрешности измерения в пространстве изображения. Обычно они находятся в диапазоне от 0,5 до 0,02 пикселей или от 1–2 мкм до 0,3 мкм.

В стандартном случае пространственное положение центра проекции в системе координат камеры, а также параметры функций, описывающих дефекты изображения, моделируются. За некоторыми исключениями, расчет параметров калибровки осуществляется посредством уравнивания фотограмметрического пучка с дополнительными параметрами. Внутренняя ориентация используемой камеры, внешняя ориентация всех изображений и трехмерные координаты всех измеренных точек изображения определяются одновременно, то есть внутренняя и внешняя ориентация и поверхность объекта коррелируют друг с другом. Как правило, это не критично, если

координаты объекта, вычисленные из уравнивания связки, представляют собой окончательный результат оценки.

Остаточные погрешности внутренней ориентации отрицательно сказываются на реконструкции объекта. Таким образом, неправильная константа камеры вызывает ошибку масштабирования в пространстве объекта, особенно в направлении полета. Неточно определенные параметры приводят к систематическому искривлению пространства объекта, например, «провисанию» цифровых моделей поверхности. Эти систематические ошибки часто могут быть обнаружены только в том случае, если в пространстве объектов имеется достаточный объем избыточных данных.

**Ориентация изображения.** Ориентация всех изображений осуществляется с помощью настройки связки. Основана на уравнениях коллинеарности, которые линеаризуются в рамках настройки для приближенных значений неизвестных. Поэтому определение достаточно хороших приближительных значений, особенно для внешней ориентации, является важной задачей. Для программ, в которых используются обычные изображения (например, классические аэроснимки), приближительные значения могут быть получены из данных планирования или навигации. Для групп изображений любой формы, как это часто бывает в фотограмметрии с близкого расстояния, процесс получения приближения должен выполняться с использованием подходящих алгоритмов последовательной взаимной ориентации и трехмерных преобразований.

**Метод структуры из движения (SfM).** Основные этапы следующие: автоматическое распознавание признаков изображения, подходящих для последующего сопоставления изображения; распределение признаков за счет минимизации расстояния между векторами признаков большой размерности; относительная ориентация соседних изображений и последовательное создание общей модели; настройка связки для определения окончательных параметров внутренней и внешней ориентации, а также трехмерных координат измеренных характерных точек (тонкое облако точек).

Оператор SIFT – один из наиболее широко используемых методов распознавания признаков. Он ищет признаки в методе на основе пирамид, который, по сути, определяет локальные распределения градиента с помощью фильтрации Лапласа-Гаусса, и использует это для построения 128-мерного вектора признаков. SIFT не определяет особенности, в которых человек-оператор мог бы измерить выступающие точки, но они находятся в аналогичном положении на соседнем изображении. Геометрическая точность обнаружения признаков составляет от 0,5 до 1 пикселя.

Для SfM требуются адекватно текстурированные поверхности объектов и относительно небольшие базовые расстояния между соседними изображениями, что означает, что при съемке должен быть обеспечен высокий уровень взаимного перекрытия.

Использование БПЛА для построения поверхности значительно распространилось благодаря SfM и обычно надежно приводит к плотным описаниям поверхности. Часто остается неясным, какие внутренние программные процессы фактически выполняются и какие математические подходы реализованы для калибровки камеры. Обычно плановая точность составляет около 1 пикселя, а точность по высоте – от 2 до 3 пикселей.

**Реконструкция поверхности.** Если тонкого облака точек недостаточно для адекватного описания поверхности объекта, обычно используется плотное облако точек. Отождествление должно быть максимально независимым от геометрических и фотограмметрических различий между изображениями.

Самым популярным в настоящее время методом построения плотного облака точек является полуглобальное отождествление. Для каждого пикселя выходного изображения SGM вычисляет соответствующую точку изображения на эпиполярной линии, минимизируя функцию стоимости, в которой сходство двух частей изображения оценивается положительно, а превышение рассчитанного параллакса сравнивается с предельными значениями и оценивается отрицательно. С этой целью создается пространство поиска, в котором поиск соответствующих точек изображения происходит по

определенным путям, в которых затем сохраняются и оцениваются несоответствия. Преимущества SGM: очень распространенный подход плотного сопоставления; хорошие результаты даже на плохо текстурированных участках (сглаживание); хорошее моделирование резких перепадов высоты; значение глубины для каждого пикселя изображения.

SGM является основным алгоритмом во многих программах SfM, а также в открытых библиотеках программного обеспечения, таких как OpenCV. Если имеется более двух изображений, обычно используется подход Multi-View Stereo (MVS), при котором оценки стерео вычисляются попарно с последующим объединением отдельных облаков точек.

В целом моделирование демонстрирует реалистичную картину качества измерения, которое может быть достигнуто при заданных входных параметрах. Однако следует отметить, что влияние калибровки камеры и ориентации изображения не принимается во внимание. Это особенно проблематично в случае конфигураций записи, подобных аэрофотоснимкам, в которых могут быть высокие корреляции между внутренней и внешней ориентацией и систематические отклонения в пространстве объекта.

В принципе, точность фотограмметрического объекта также соответствует новым методам, как это было известно на протяжении десятилетий. Существенные влияющие переменные, такие как масштаб изображения, точность измерения и согласования изображения, а также конфигурации секций лучей (например, отношение высоты к основанию), по-прежнему действительны. В прошлом принцип достижения адекватного фотограмметрического результата с использованием как можно меньшего количества изображений, сегодня нет ограничений на количество используемых изображений. С одной стороны, это приводит к большей надежности определения точки, но также приводит к слишком оптимистичной информации, поскольку вычисленные стандартные отклонения и среднеквадратичные значения зависят от избыточности. Как показывает практика, для среднего стандартного отклонения координат объекта в плановом положении можно достичь примерно 1 пикселя и по высоте примерно от 2 до 3 пикселей.

#### Литература

1. Луман, Т. Bildbasierte 3D-реконструкция поверхности // DVW-Schriftenreihe. – 2018. – № 82. – С. 31–44.
2. Луман, Т. Фотограмметрия с близким применением – основы, методы, примеры / Т. Луман. – 4-е издание. – Берлин : VDE Verlag GmbH, 2018. – 783 с.
3. Михайлов, А.П. Фотограмметрия : учебник для вузов / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев; под общ. ред. А.Г. Чибуничева. – М. : Изд-во МИИГАиК, 2016. – 294 с.

УДК 528.2/5

## **ПЕРВЫЕ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ**

И.В. Вахнер, Е.И. Лабунович, В.В. Мкртычян  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь, kafgiakgt@gmail.com

В данной статье представлена краткая история построения астрономо-геодезической сети на территории современной Беларуси (начало 19 века) до начала 20 века. Определены условные этапы построения государственной геодезической сети. Изложена информация о вкладе Корпуса военных топографов в развитие картографической, астрономо-геодезической и геодезической работ. Повествуется о проведенных измерениях под