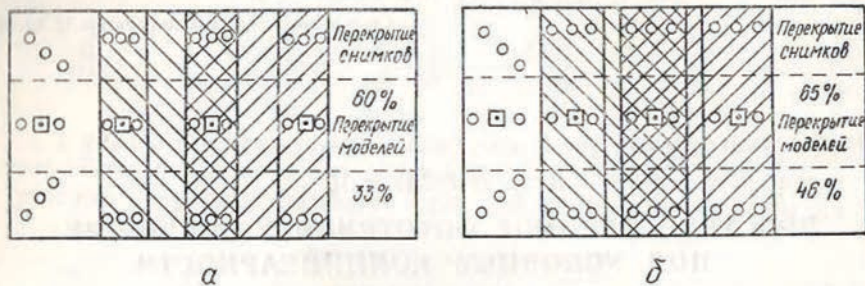


ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ФОТОТРИАНГУЛИРОВАНИЕ ПОД УСЛОВИЕМ КОЛЛИНЕАРНОСТИ

При решении практических инженерных задач в прикладной фотограмметрии часто возникают осложнения, при которых невозможно соблюдать основные требования к фотосъемочному материалу, чтобы нормально фототриангулировать. К таким особым трудностям относятся криволинейность и ломаность маршрутов при аэроизысканиях в дорожном деле, фотограмметрической инвентаризации и паспортизации путей сообщения, пространственно-поверхностная замкнутость маршрутов и блоков при картографировании экстерьера и интерьера архитектурных памятников, разномасштабность и разнофокусность снимков старых залетов, использование архивных снимков, применение неметрических фотокамер и т. д. Наряду с этим нужно иметь в виду, что размер и конфигурация сетей будут меняться в больших пределах, а алгоритм должен быть реализован на мини- или микроЭВМ, т. е. нужно учесть основные тенденции и требования современности.

Сущность метода. Оптимальные условия фототриангулирования заключаются в наличии 60...70% перекрытия снимков в направлении создаваемых сетей, при котором обеспечивается соответственно 33...57% перекрытия образуемых моделей по смежным снимкам (см. рисунок). При построении жесткой модели маршрута особое значение имеет зона тройного перекрытия снимков, в которой выбираются и измеряются так называемые *опорные* и *квазиопорные* точки, последовательно чередующиеся при объединении отдельных моделей в общую систему координат [1]. Следовательно, при составлении и решении уравнений коллинеарности (подориентирование связки) идентичные точки из смежной предыдущей модели рассматриваются как *твердые*, а включаемые новые — как *определяемые*. Для повышения жесткости и точности создаваемых сетей в модель обычно включают 18 точек (по девять опорных и квазиопорных). При таком последовательно совместном решении задачи взаимного ориентирования снимков (связок) и объединения моделей в общую систему координат

создаваемой сети учитываются все возможные условия: общий масштаб и горизонт смежных моделей, боковые условия наклона, минимизация прогибов и скручивания сети, удачное использование избыточных измерений и т. д. Таким образом достигается высокая точность, часто невязки получаются пренебрегаемо малыми величинами. Сети целесообразно строить в геодезической системе координат. Для этого исходную стереопару нужно обеспечить



Перекрывание снимков и моделей.

опорными геодезическими точками или предварительно ориентировать по высотным квазиопорным точкам. При этом масштаб модели определяется по измеренным контрольным линиям.

Алгоритм и программа состоят из следующих основных частей: 1) внутреннего ориентирования снимков — восстановления связей проектирующих лучей; 2) формирования и решения уравнений поправок к определяемым параметрам; 3) окончательного уравнивания сети по опорным геодезическим точкам и оценки точности полученных результатов.

В основу метода положены общеизвестные уравнения коллинеарности:

$$\begin{aligned} \bar{x}_i - x_0 &= (z - z_0) \frac{a_{11}(X_i - X_0) + a_{21}(Y_i - Y_0) + a_{31}(Z_i - Z_0)}{a_{13}(X_i - X_0) + a_{23}(Y_i - Y_0) + a_{33}(Z_i - Z_0)}, \\ \bar{y}_i - y_0 &= (z - z_0) \frac{a_{12}(X_i - X_0) + a_{22}(Y_i - Y_0) + a_{32}(Z_i - Z_0)}{a_{13}(X_i - X_0) + a_{23}(Y_i - Y_0) + a_{33}(Z_i - Z_0)}, \end{aligned} \quad (1)$$

которые после линеаризации имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} v_{x_i} &= G_{XO_i} dX_0 + G_{YO_i} dY_0 + G_{ZO_i} dZ_0 + G_{X_i} dX + G_{Y_i} dY + G_{Z_i} dZ + \\ &+ G_{\omega_i} d\omega + G_{\varphi_i} d\varphi + G_{x_i} dx + G_{XO_i} dx_0 + G_{YO_i} dy_0 + G_{ZO_i} dz_0 + \bar{x}_i - x \\ v_{y_i} &= H_{XO_i} dX_0 + H_{YO_i} dY_0 + H_{ZO_i} dZ_0 + H_{X_i} dX + H_{Y_i} dY + H_{Z_i} dZ + \\ &+ H_{\omega_i} d\omega + H_{\varphi_i} d\varphi + H_{x_i} dx + H_{XO_i} dx_0 + H_{YO_i} dy_0 + H_{ZO_i} dz_0 + \bar{y}_i - y \end{aligned} \quad (2)$$

где G_{XO}, \dots, H_{ZO_i} — частные производные функций (1) по соответствующим переменным.

Уравнения (2) можно решить тремя вариантами.

1. Поскольку число твердых и определяемых точек в пределах стереопары сравнительно небольшое (18 точек), то их решают по методу наименьших квадратов сразу для всех неизвестных параметров путем последовательных итераций.

2. В целях более рационального использования памяти ЭВМ уравнения (2) разбивают на две независимые группы: уравнения поправок элементов ориентирования снимков и уравнения поправок координат определяемых точек. В этом случае последовательность итерационного решения: вычисляются поправки для элементов ориентирования снимков, затем по исправленным элементам снимков формируется вторая группа уравнений поправок для квазиопорных точек модели, после решения которых получают исправленные координаты.

3. В процессе объединения элементарных связок и вычисления координат квазиопорных точек максимального сокращения объема вычислений достигают путем применения метода последовательного чередования прямых и обратных фотограмметрических засечек, решаемых под условием расширенного минимума остаточных невязок в измеряемых и определяемых величинах [1].

Оценка точности определяемых параметров выполняется по ковариационным матрицам для каждой подсоединяемой связки и по остаточным невязкам в перекрывающихся точках. Согласно методике [1] определяется стандарт единицы веса, характеризующий жесткость объединения моделей.

Выполненные исследования показали, что все три варианта практически приводят к тождественным результатам. Поэтому программа в окончательном виде реализована на базе использования прямых и обратных фотограмметрических засечек (третий вариант), при котором достигается минимальный объем вычислений.

Блочное фототриангулирование. Совершенно аналогично методам наращивания строятся и блочные (многомаршрутные) фототриангуляционные сети, т. е. путем использования «опорных и квазиопорных» точек последовательно подсоединяются все связки. При наличии 60% продольного и 30% поперечного перекрытий снимков целесообразно применять помаршрутное объединение связок в общий блок. В этом случае при построении последующего маршрута сети в качестве опорных точек включаются общие идентичные точки из предыдущего маршрута, которые размещаются в трех рядах в зоне поперечного перекрытия снимков (см. рисунок). Для полного обеспечения опорными точками исходных стереопар целесообразно использовать поперечные маршруты. Если продольное и поперечное перекрытия снимков составляют 60%, успешно можно применять радиально-концентрическое объединение, при котором построение блока начинается от среднего его звена.

Абсолютное (внешнее) уравнивание фототриангуляционных сетей обычно выполняется после пространственного линейного конформного трансформирования и браковки недоброкачественных

опорных точек путем интерполирования остаточных невязок согласно пространственным полиномам общего вида:

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1 \bar{X} + a_2 \bar{Y} + a_3 \bar{Z} + a_4 \bar{X}^2 + a_5 \bar{Y}^2 + a_6 \bar{Z}^2 + a_7 \bar{X}\bar{Y} + a_8 \bar{Y}\bar{Z} + \dots \\ Y &= b_0 + b_1 \bar{X} + b_2 \bar{Y} + b_3 \bar{Z} + b_4 \bar{X}^2 + b_5 \bar{Y}^2 + b_6 \bar{Z}^2 + b_7 \bar{X}\bar{Y} + b_8 \bar{Y}\bar{Z} + \dots \\ Z &= c_0 + c_1 \bar{X} + c_2 \bar{Y} + c_3 \bar{Z} + c_4 \bar{X}^2 + c_5 \bar{Y}^2 + c_6 \bar{Z}^2 + c_7 \bar{X}\bar{Y} + c_8 \bar{Y}\bar{Z} + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

В случае наличия большого числа опорных точек задача решается по методу наименьших квадратов, т. е. применяется среднеквадратичное интерполирование. Надежная оценка окончательных результатов производится по контрольным измерениям: геодезическим точкам или линиям, определенным в пространстве исследуемого объекта. Оценку точности можно также выполнять и по методике, предложенной в [2].

Программа пространственного фототриангулирования «коллинеарность» составлена на языке Фортран и реализована на мини-ЭВМ СМ-3 и СМ-4. Она состоит из подпрограмм, выбранных из пакета программ для выполнения научно-технических расчетов, и работает в диалоговом режиме под управлением операционной системы СМ/РАФОС с некоторыми отклонениями от стандартной версии. Для ввода исходных данных можно использовать любое устройство ввода.

Производственно-опытные работы. Исследование литодинамического состояния склонов геологических образований и береговых процессов рек, озер и водохранилищ производилось по снимкам, полученным аэрофотосъемочной камерой $f=350$ мм в масштабах 1:1000 и 1:3000, при котором средние стандарты координат определяемых точек составляли $\delta(XYZ)=5$ см и $\delta(XYZ)=10$ см соответственно. В архитектурной фотограмметрии при фототриангулировании по метрическим снимкам масштабов 1:200...1:600 для четких контуров точек легко достигалась точность $\delta(XYZ)=1...2$ см, что удовлетворяет требованиям архитектурных чертежей, составляемых в масштабах 1:50 и 1:100. Аналогичные результаты получены и при выполнении других производственных работ в прикладной фотограмметрии.

В заключение отметим, что удачное использование функциональных зависимостей коллинеарности при объединении смежных проектирующих связей привело к созданию компактного и универсального алгоритма и программы для пространственного фототриангулирования на мини- или микроЭВМ. Предлагаемый вариант решения фотограмметрических уравнений может рассматриваться как своеобразная замена рекуррентных формул, используемых при обработке сложных геодезических построений. Появляется возможность фототриангулирования по неметрическим снимкам, что значительно расширяет возможности «близкосъемочной» фотограмметрии и может заинтересовать многих специалистов различных областей науки и практики. Для обработки

метрических снимков применяется вариант программы без калибровки. Таким образом, для построения опорных сетей при аэроизысканиях сооружений линейного типа, при картографировании сложных архитектурных ансамблей или старых городов в аэрогеодезическом производстве успешно можно применять разработанный метод пространственного фототриангулирования.

1. *Вайнаускас В. В., Плескачаускас А. А.* К разработке алгоритмов для решения некоторых фотограмметрических задач // *Геодезия и картография*. 1985. № 12. С. 26—30.
2. *Вайнаускас В. В.* Система моделей оптимизации и оценки геодезических и фотограмметрических опорных сетей // *Геодезия и картография*. 1979. № 8. С. 23—30.