

В. В. ВАЙНАУСКАС, А. А. ПИЛИПАЙТИС

## ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ В АРХИТЕКТУРНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

В связи с выполнением в Литве больших работ по консервации и реставрации центров старых городов, созданием в сельской местности крупных колхозных хозяйств, проведением мелиорационных и землеустроительных работ возникла необходимость комплексной инвентаризации ценных исторических, архитектурных памятников, подготовки технической документации и ее архивизации, чтобы в любое время можно было реставрировать и восстановить интересные объекты.

Для решения поставленных задач в 1969 г. при Вильнюсском университете была создана лаборатория инженерной фотограмметрии, а в 1972 г. при Институте консервации памятников — лаборатория архитектурной фотограмметрии. Первая лаборатория занимается комплексной инвентаризацией и созданием архива документации ценных исторических, архитектурных памятников и их достопримечательных мест, т. е. выполнением фотографических, фотограмметрических и геодезических работ в целях обмера различных объектов литовского зодчества. Вторая лаборатория обеспечивает архитекторов-реставраторов фотограмметрическими

материалами, необходимыми для подготовки проектов реставрации конкретных объектов.

Полевые фотосъемочные работы выполняют с использованием метрических фотокамер UMK 10/1318, Photheo 19/1318, TAL, SMK 5,5/0808. В отдельных случаях для обмера небольших объектов при наличии малого оперативного пространства применяют неметрические фотокамеры типа «Салют», «Киев» и др., формат которых  $55 \times 55$  мм.

Для фотограмметрической обработки снимков используют современные аналоговые стереоприборы: стереопроекторы, стереографы, топокарты, технокарты и стереопланиграфы.

В настоящее время в целях автоматизации фотограмметрических процессов обработки снимков и повышения точности окончательных результатов разработан аналитический метод обработки измерительной информации на базе широкого использования стереокомпараторов мини-ЭВМ, а для перехода к составлению образно-графических материалов — графопостроителей.

В связи с этим возникла необходимость разработки таких алгоритмов и программ, чтобы, реализуя возможности мини-ЭВМ, можно было достичь максимальной точности решаемых задач. Учитывая, что при картографировании экстерьера и интерьера архитектурных памятников в качестве геодезической опоры наряду с координированными точками часто используют измеренные в пространстве объекта линии, а иногда только базисы фотографирования, то наиболее оптимальной математической моделью цифровой обработки снимков оказалась модель, построенная на базе условия компланарности, которую впоследствии пространственным линейным конформным трансформированием легко преобразовать в любую систему координат исследуемого объекта.

**Алгоритмы.** Ниже приведем ряд универсальных и стандартизованных алгоритмов, предназначенных для аналитической обработки снимков любого вида съемки. Системы координат и обозначения фотограмметрических параметров представлены на рисунке.

1. Внутреннее ориентирование — восстановление связки лучей  
1. Вычисление нулевых отчетов:

$$MO_x = (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 + \bar{x}_4)/4; \quad MO_y = (\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4)/4;$$

$$MO_p = (\bar{p}_1 + \bar{p}_2 + \bar{p}_3 + \bar{p}_4)/4; \quad MO_q = (\bar{q}_1 + \bar{q}_2 + \bar{q}_3 + \bar{q}_4)/4.$$

2. Вычисление координат точек левого и правого снимков:

$$\hat{x}'_i = \bar{x}'_i - MO_x; \quad \hat{x}''_i = \hat{x}'_i - (\bar{p}_i - MO_p);$$

$$\hat{y}'_i = \bar{y}'_i - MO_y; \quad \hat{y}''_i = \hat{y}'_i - (\bar{q}_i - MO_q).$$

3. Исправление координат точек снимков по данным калибровки:

$$x'_i = \hat{x}'_i - x_0; \quad x''_i = \hat{x}''_i - x_0;$$

$$y'_i = \hat{y}'_i - y_0; \quad y''_i = \hat{y}''_i - y_0.$$

4. Исправление координат точек снимков по данным калибровки:

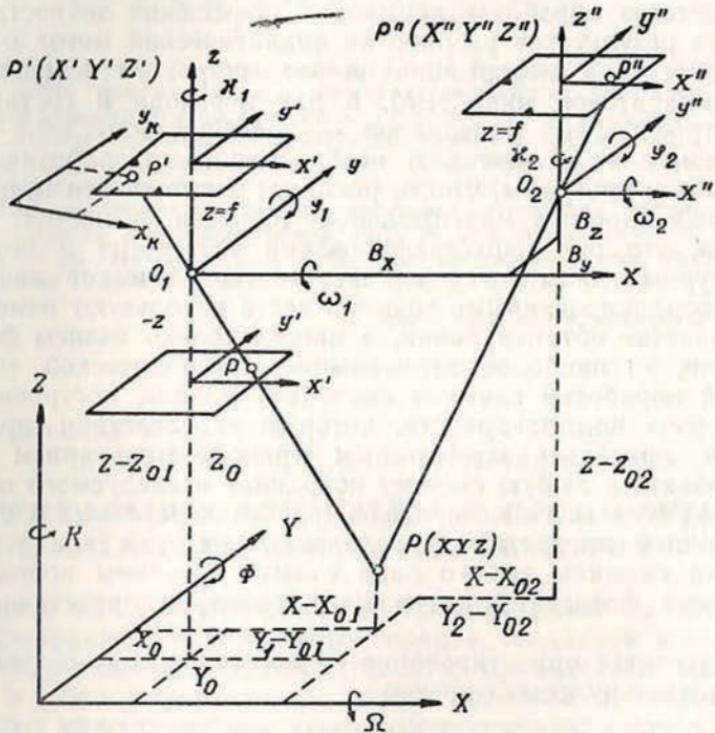
$$x'_i = a_0 + a_1 \hat{x}'_i - b_1 \hat{y}'_i; \quad x''_i = a_0 + a_1 \hat{x}'_i + a_2 \hat{y}'_i;$$

$$y'_i = b_0 + b_1 \hat{x}'_i + a_1 \hat{y}'_i; \quad y''_i = b_0 + b_1 \hat{x}'_i + b_2 \hat{y}'_i.$$

5. Исправление координат точек снимков за дисторсию и рефракцию:

$$x'_i + \Delta x'_i = x'_i + (\Delta r'_{11} + \Delta r'_{21}) x'_i / \sqrt{x'^2_i + y'^2_i};$$

$$y'_i + \Delta y'_i = y'_i + (\Delta r'_{12} + \Delta r'_{22}) y'_i / \sqrt{x'^2_i + y'^2_i}.$$



Геометрия фотограмметрического дуплета.

## II. Обработка пары снимков нормального случая.

1. Вычисление пространственных координат точек объекта:

$$\hat{X}_i = Bx'_i/p_i = \hat{Y}_i x'_i/f; \quad p_i = x'_i - x''_i;$$

$$\hat{Y}_i = Bf/p_i; \quad B_z = \hat{Z}'_i - \hat{Z}''_i;$$

$$\hat{Z}'_i = By'_i/p_i = \hat{Y}_i y'_i/f; \quad \hat{Z}_i = (\hat{Z}'_i + \hat{Z}''_i)/2;$$

$$\hat{Z}''_i = By''_i/p_i + B_z = \hat{Y}_i y''_i/f + B_z.$$

2. Корректура масштаба модели по контрольным расстояниям

$$\mu = [S_{ik}] / \sqrt{[(\hat{X}_k - \hat{X}_i)^2 + (\hat{Y}_k - \hat{Y}_i)^2 + (\hat{Z}_k - \hat{Z}_i)^2]}.$$

3. Вычисление окончательных координат точек объекта:

$$X_i = X_{0i} + \mu \hat{X}_i; \quad Y_i = Y_{0i} + \mu \hat{Y}_i; \quad Z_i = Z_{0i} + \mu \hat{Z}_i.$$

III. Взаимное ориентирование пары снимков.

Элементы ориентирования снимков  $by, bz, \varphi, \omega, \chi$ .

Условие компланарности

$$q = \begin{vmatrix} bx & x' & \bar{x}'' \\ by & y' & \bar{y}'' \\ bz & z' & \bar{z}'' \end{vmatrix} = 0.$$

Вычислительные процедуры:

1. Подбор приближенных значений элементов ориентирования снимков  $by, bz, \varphi, \omega, \chi$ .

2. Трансформирование координат точек правого снимка:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i'' \\ y_i'' \\ z \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} x_i'' + a_{12} y_i'' + a_{13} z \\ a_{21} x_i'' + a_{22} y_i'' + a_{23} z \\ a_{31} x_i'' + a_{32} y_i'' + a_{33} z \end{bmatrix}.$$

Здесь:

$$a_{11} = \cos \varphi \cos \chi + \sin \varphi \sin \omega \sin \chi;$$

$$a_{12} = -\cos \varphi \sin \chi + \sin \varphi \sin \omega \cos \chi;$$

$$a_{13} = \sin \varphi \cos \omega; \quad a_{21} = \cos \omega \sin \chi;$$

$$a_{22} = \cos \omega \cos \chi; \quad a_{23} = -\sin \omega;$$

$$a_{31} = -\sin \varphi \cos \chi + \cos \varphi \sin \omega \sin \chi;$$

$$a_{32} = \sin \varphi \sin \chi + \cos \varphi \sin \omega \cos \chi;$$

$$a_{33} = \cos \varphi \cos \omega.$$

3. Составление уравнений поправок для идентичных точек:

$$v_{qi} = k_{yi} \delta b_y + k_{zi} \delta b_z + k_{\varphi i} \delta \varphi + k_{\omega i} \delta \omega + k_{\chi i} \delta \chi + q_{0i};$$

$$q_{0i} = \begin{vmatrix} bx & x'_i & \bar{x}''_i \\ by & y'_i & \bar{y}''_i \\ bz & z'_i & \bar{z}''_i \end{vmatrix}; \quad k_{yi} = \begin{vmatrix} 0 & x'_i & \bar{x}''_i \\ bx & y'_i & \bar{y}''_i \\ 0 & z'_i & \bar{z}''_i \end{vmatrix}; \quad k_{zi} = \begin{vmatrix} 0 & x'_i & \bar{x}''_i \\ 0 & y'_i & \bar{y}''_i \\ bx & z'_i & \bar{z}''_i \end{vmatrix};$$

$$k_{\varphi l} = \begin{vmatrix} bx & x'_l & \bar{z}'_l \\ by & y'_l & 0 \\ bz & z'_l & \bar{z}''_l \end{vmatrix}; \quad k_{\omega l} = \begin{vmatrix} bx & x'_l & \bar{y}''_l \sin \varphi \\ by & y'_l - \bar{x}'_l \sin \varphi - \bar{z}'_l \cos \varphi \\ bz & z'_l & \bar{y}''_l \cos \varphi \end{vmatrix};$$

$$k_{\alpha l} = \begin{vmatrix} bx & x'_l - \bar{x}'_l \cos \varphi \sin \alpha - \bar{y}'_l \cos \varphi \cos \alpha \\ by & y'_l - \bar{x}'_l \cos \omega \cos \alpha - \bar{y}'_l \cos \omega \sin \alpha \\ bz & z'_l - \bar{x}'_l \cos \varphi \sin \omega \cos \alpha - \bar{y}'_l \cos \varphi \sin \omega \sin \alpha \end{vmatrix}.$$

В случае наличия малых углов поворотов ( $\varphi \approx \omega \approx \alpha \approx 0$ )

$$k_{\omega l} = \begin{vmatrix} bx & x' & 0 \\ by & y'_l - \bar{z}''_l & ; \\ bz & z'_l & \bar{y}'_l \end{vmatrix}; \quad k_{\alpha} = \begin{vmatrix} bx & x'_l - \bar{y}'_l \\ by & y'_l & \bar{x}'_l \\ bz & z'_l & 0 \end{vmatrix}.$$

4. Составление и решение нормальных уравнений:

$$A^T P A \delta + A^T P L = 0; \quad \delta = -(A^T P A)^{-1} A^T P L.$$

5. Вычисление итераций:

$$\begin{aligned} by^{k+1} &= by^k + \delta by; & \varphi^{k+1} &= \varphi^k + \delta \varphi; \\ bz^{k+1} &= bz^k + \delta bz; & \omega^{k+1} &= \omega^k + \delta \omega; \\ \alpha^{k+1} &= \alpha^k + \delta \alpha. \end{aligned}$$

6. Вычислительные операции 2—5 повторяются до тех пор, пока стабилизируется изменение элементов ориентирования снимков. Обычно для упрощения вычислительного процесса принимается

$$bx = 1.$$

#### IV. Пространственная прямая засечка

Определение координат точек модели объекта  $bx = 1$ :  $x = x_1 = x_2$ ;  $z = z_1 = z_2$ ;  $y = (y_1 + y_2)/2$ ;

$$x/x' = y_1/y' = z_1/z' = \lambda;$$

$$(x - 1)/\bar{z}'' = (y_2 - by)/\bar{y}'' = (z - bz)/\bar{z}'' = \mu.$$

1. Вычисление масштабных коэффициентов:

$$\lambda = \frac{\bar{z}'' - bz\bar{z}''}{x'\bar{z}'' - z'\bar{x}''}; \quad \mu = \frac{z' - bzx'}{x'\bar{z}'' - z'\bar{x}''}.$$

2. Вычисление координат точек модели объекта:

$$y_1 = \lambda y'; \quad y_2 = by + \mu \bar{y}'';$$

$$x = \lambda x'; \quad y = (y_1 + y_2)/2; \quad z = \lambda z';$$

$$X_l = X_{01} + \tilde{\mu} x_l; \quad Y_l = Y_{01} + \tilde{\mu} y_l; \quad Z_l = Z_{01} + \tilde{\mu} z_l;$$

$$\tilde{\mu} = B / \sqrt{1 + by^2 + bz^2}.$$

$B$  — базис фотографирования, измеренный в натуре.

## V. Пространственное конформное трансформирование.

Внешнее ориентирование модели объекта.

Дано:  $n (n \geq 3)$  идентичных точек в системах координат  $XYZ$  и  $xyz$ .

Найти: 7 трансформационных параметров  $X_s, Y_s, Z_s, \mu, \Phi, \Omega, K$  и трансформированные координаты точек объекта.

### Вычислительные процедуры

Число идентичных точек  $n i=1, 2, 3, \dots, n$ .

1. Вычисление координат центров тяжести:

$$X_s = [X_i]/n; \quad Y_s = [Y_i]/n; \quad Z_s = [Z_i]/n;$$

$$x_s = [x_i]/n; \quad y_s = [y_i]/n; \quad z_s = [z_i]/n.$$

2. Вычисление центрированных координат:

$$\hat{X}_i = X_i - X_s; \quad \hat{Y}_i = Y_i - Y_s; \quad \hat{Z}_i = Z_i - Z_s;$$

$$\hat{x}_i = x_i - x_s; \quad \hat{y}_i = y_i - y_s; \quad \hat{z}_i = z_i - z_s.$$

3. Исходные значения масштаба и углов поворотов

$$\mu = \sqrt{\hat{X}_i^2 + \hat{Y}_i^2 + \hat{Z}_i^2} / \sqrt{\hat{x}_i^2 + \hat{y}_i^2 + \hat{z}_i^2}; \quad \Phi = \Omega = K = 0.$$

4. Вычисление коэффициентов матрицы поворота:

$$a_{11} = \cos \Phi \cos K + \sin \Phi \sin \Omega \sin K;$$

$$a_{12} = -\cos \Phi \sin K + \sin \Phi \sin \Omega \cos K;$$

$$a_{13} = \sin \Phi \cos \Omega; \quad a_{21} = \cos \Omega \sin K;$$

$$a_{22} = \cos \Omega \cos K; \quad a_{23} = -\sin \Omega;$$

$$a_{31} = -\sin \Phi \cos K + \cos \Phi \sin \Omega \sin K;$$

$$a_{32} = \sin \Phi \sin K + \cos \Phi \sin \Omega \cos K;$$

$$a_{33} = \cos \Phi \cos \Omega.$$

5. Вычисление трансформированных координат точек:

$$\hat{X}'_i = \mu (a_{11} \hat{x}_i + a_{12} \hat{y}_i + a_{13} \hat{z}_i);$$

$$\hat{Y}'_i = \mu (a_{21} \hat{x}_i + a_{22} \hat{y}_i + a_{23} \hat{z}_i);$$

$$\hat{Z}'_i = \mu (a_{31} \hat{x}_i + a_{32} \hat{y}_i + a_{33} \hat{z}_i).$$

6. Составление нормальных уравнений и их решение:

$$\begin{bmatrix} [\hat{X}'_i^2 + \hat{Y}'_i^2] & -[\hat{X}'_i \hat{Y}'_i] & -[\hat{Y}'_i \hat{Z}'_i] \\ -[\hat{X}'_i \hat{Y}'_i] & +[\hat{Y}'_i^2 + \hat{Z}'_i^2] & -[\hat{X}'_i \hat{Z}'_i] \\ -[\hat{Y}'_i \hat{Z}'_i] & -[\hat{X}'_i \hat{Z}'_i] & +[\hat{X}'_i^2 + \hat{Y}'_i^2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi}{\partial K} \\ \frac{\partial \Omega}{\partial K} \\ \frac{\partial K}{\partial K} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_s \hat{X}'_i - X_s \hat{Z}'_i \\ \hat{Y}_i \hat{Z}'_i - \hat{Z}_i \hat{Y}'_i \\ \hat{X}_i \hat{Y}'_i - \hat{Y}_i \hat{X}'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\delta\mu = \frac{[\hat{X}_i'(\hat{X}_i - \hat{X}'_i) + \hat{Y}_i'(\hat{Y}_i - \hat{Y}'_i) + \hat{Z}_i'(\hat{Z}_i - \hat{Z}'_i)]}{[\hat{X}'^2_i + \hat{Y}'^2_i + \hat{Z}'^2_i]}.$$

## 7. Вычисление итераций:

$$\Phi^{k+1} = \Phi^k + \delta\Phi; \quad \Omega^{k+1} = \Omega^k + \delta\Omega; \quad K^{k+1} = K^k + \delta K;$$

$$\mu^{k+1} = \mu^k (1 + \delta\mu).$$

Вычислительные операции 4—7 повторяются до тех пор, пока стабилизируется изменение параметров ориентирования модели объекта.

## 8. Трансформирование координат всех остальных точек модели:

$$X' = \mu (\hat{a}_{11}\hat{x}_i + \hat{a}_{12}\hat{y}_i + \hat{a}_{13}\hat{z}_i) + X_s;$$

$$Y' = \mu (\hat{a}_{21}\hat{x}_i + \hat{a}_{22}\hat{y}_i + \hat{a}_{23}\hat{z}_i) + Y_s;$$

$$Z' = \mu (\hat{a}_{31}\hat{x}_i + \hat{a}_{32}\hat{y}_i + \hat{a}_{33}\hat{z}_i) + Z_s.$$

## 9. Оценка точности:

$$v_{xi} = X_i - X'_i; \quad v_{yi} = Y_i - Y'_i; \quad v_{zi} = Z_i - Z'_i;$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{[v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2]/(3n - 7)}{}} = \sigma(x) = \sigma(y) = \sigma(z).$$

**Программы.** Производственные опыты убедительно показали, что для успешного решения возникающих различных задач с учетом условий оптимизации и обеспечения необходимой точности окончательных результатов нужно располагать пакетом соответствующих программ обработки фотограмметрической измерительной информации. По приведенным стандартизованным алгоритмам был создан пакет программ. Следует подчеркнуть, что приведенные алгоритмы и соответствующие программы являются универсальными, так как они пригодны для обработки любых снимков (воздушных и наземных), т. е. учтены требования стандартизации и унификации.

При различных вариантах сочетания приведенных алгоритмов составлены следующие программы.

1. Программа <КООРДИНАТА> для предварительной обработки фотограмметрической измерительной информации и вычисления исправленных координат точек снимков (алгоритм 1).

2. Программа <ИДЕАЛ> для обработки пары снимков нормального случая съемки (алгоритм 2). Программа имеет два варианта: а) масштаб модели определяют по базису фотографирования; б) масштаб модели корректируют по измеренным контрольным расстояниям.

3. Программа <КОМПЛАННОСТЬ> для обработки пары снимков общего случая съемки. Программа имеет три варианта: а) масштаб модели определяют по базису фотографирования; б) масштаб модели определяют по контрольным расстояниям, из-

меренным в пространстве объекта; в) модель ориентируют по опорным точкам.

Рассмотрим основные характеристики одной программы.

Программа <КОМПЛАНАРНОСТЬ> (алгоритмы 1, 3, 4 и 5) составлена на языке ФОРТРАН и реализована на мини-ЭВМ СМ-3. Выполнение программы осуществляется под управлением операционной системы ДОС СМ и требует минимального объема оперативной памяти: 16 К слов. Ввод исходной информации производится с перфоленты или непосредственно с клавиатуры видеотерминала. Печатание выполняется алфавитно-цифровым печатающим устройством ДАРО-1156. Промежуточная и контрольная информация выводятся на экран видеотерминала.

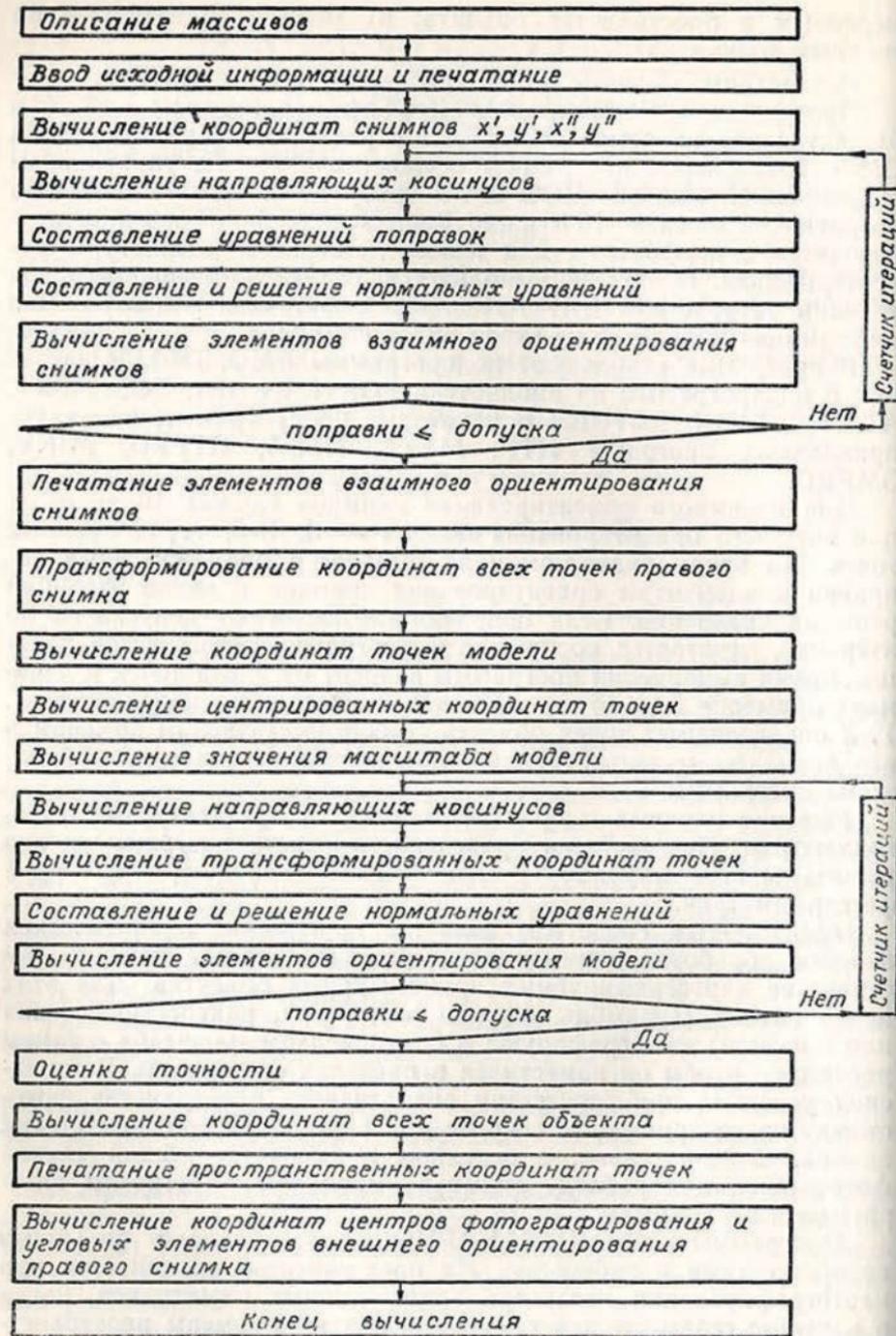
В программе используют подпрограммы АМО, DETER, функции и подпрограммы из библиотеки FORTRAN SIN, COS, SQRT, ATAN 2, LINK, RETURN и некоторые подпрограммы из пакета прикладных программ НТР: MATA, NESA, GTPRD, MINV, GMPRD.

Для взаимного ориентирования снимков служат 10 точек, а для внешнего ориентирования модели — 3, 4, 5, ..., 12 опорных точек. На экран видеотерминала выводятся промежуточные поправки к элементам ориентирования снимков и число итераций решения уравнений. Если поправки не достигают допуска за 20 итераций, печатается сообщение и программа выполняется дальше. Время выполнения программы зависит от числа точек и занимает примерно 5...15 мин. На печать выводятся координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  определяемых точек объекта с соответствующим номером и все элементы ориентирования снимков. Ниже приводится блок-схема программы.

**Решение научных и практических задач архитектурной фотограмметрии.** При наличии приведенного пакета программ можно решать многие научные и практические задачи архитектурной фотограмметрии.

Эффективным средством является применение аналитических методов обработки снимков для сгущения опорных точек в пространстве картографируемых архитектурных объектов. Для этих целей объект (ансамбль, фасады экстерьера, ракурсные сечения или профили) фотографируют в более мелком масштабе с таким расчетом, чтобы он поместился в пределах стереопары. В городских условиях при отсутствии оперативного пространства фотосъемку часто производят с крыш или через окна противостоящих зданий. Следовательно, в основном применяется общий случай фотосъемки, а обработку снимков выполняют по строгим алгоритмам и программам.

Программы <КОМПЛАНАРНОСТЬ> обладают большими возможностями и гибкостью. Их преимущество проявляется при картографировании интерьера архитектурных памятников, когда в качестве геодезической опоры используют промеры пространственных расстояний, высокоточно измеряемых рулеткой. В этом случае масштабированная модель легко трансформируется в любую плоскость исследуемого объекта, в результате чего создается



Блок-схема программы <Компланарность>.

опора, необходимая для обработки снимков более крупного масштаба на аналоговых стереоприборах. При съемке интерьера, как показала практика, ввиду чрезвычайно неблагоприятных условий (слабое освещение, большие углы наклона, короткий базис и др.) метод геодезических засечек неэффективен. Методом аналитической фотограмметрии все эти задачи решаются очень просто и точно.

Следует отметить, что большое значение имеет применение аналитических методов для фотограмметрического сгущения опорных точек по огибающим поверхностям фронтальных фасадов улиц или развертывания куполообразных поверхностей в плоскость чертежа.

Перспективно также применение аналитических методов обработки снимков для автоматического составления высокоточных архитектурных чертежей различных масштабов путем подключения к ЭВМ графопостроителей, например, типа «ГРАФОР». В этом случае все основные контурные линии исследуемого объекта вычерчивает автоматический координатограф, а второстепенные детали наносят в процессе корректуры, например, мелкие детали декора, для чего обычно используют трансформированные снимки. Кроме того, возможно более широкое применение неметрических фотокамер для обмера труднодоступных частей исследуемых объектов, что, в свою очередь, повышает производительность труда.

**Список литературы:** 1. Лобанов А. Н., Журкин И. Г. Автоматизация фотограмметрических процессов. — М.: Недра, 1980. 2. Сердюков В. М. Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве. — М.: Недра, 1977. 3. Rüger W., Pietshner J., Regensburger K. Photogrammetrie. — Berlin: VEB Verlag Bauwesen, 1978.