

С 344.1т
А-50

+



4195/82
Алиев Ф. К. и др.
Б1-1-82-485

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-1-82-485

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1982

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

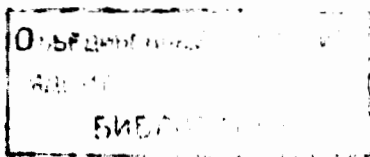
Б1-1-82-485

Ф.К.Алиев*, А.А.Аскарходжаев*, В.А.Беляков

ПРОГРАММА GLOBAL ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ
КОНСТАНТ СИСТЕМ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ТРЕКОВЫХ КАМЕР

Депонированная публикация ОИЯИ

24 06 82



Дубна, 1982 год

* Ташкентский государственный университет

А Н Н О Т А Ц И Я

Описана программа определения оптических констант, позволяющая использовать намного более простые и доступные объемные тест-объекты по сравнению с другими известными методами. Приводятся результаты проверки программы методом Монте-Карло, что дает возможность исследовать влияние различных факторов на точность определения оптических констант.

В В Е Д Е Н И Е

Одним из этапов обработки фíльмовой информации, получаемой в трековых камерах, является геометрическая реконструкция событий по стереоснимкам. При этом предполагается, что оптические параметры (константы) используемой системы фотóграфирования предварительно определены с достаточной точностью. Указанные константы, как правило, включают в себя

- характеристики фотокамер;
- параметры, задающие взаимные ориентации используемых систем координат;
- характеристики промежуточных оптических сред на пути светового луча от объекта до его изображения.

Для определения оптических констант и учета систематических погрешностей разрабатываются различные методы и соответствующие программы для ЭВМ. Хотя такие программы логически не зависят от программ анализа измерений, тем не менее, они составляют часть всей системы обработки данных с трековых камер.

Как показывает опыт, используемые в настоящее время программы определения оптических констант имеют ряд недостатков, которые в той или иной степени ограничивают их применимость. Эти недостатки сводятся в основном к следующему:

- параметры оптики, найденные методами стереофотографирования, приводят к большим погрешностям при реконструкции координат меток, которые лежат вблизи базы фотóграфирования;
- коррекция дисторсий в предположении аксиальной симметрии оказывается грубым приближением при параметризации широкоугольных объективов, для которых нередко наблюдаются от-

- клонения от центрированной оптики;
- жесткие требования к объемному тест-объекту, заложенные, например, в известной программе *PYTHON* [1] и других близких к ней по подходу программам, трудно обеспечить для целого ряда трековых камер;
 - разработанные методы предполагают использование сложных в изготовлении и дорогостоящих устройств [2], которые далеко не всегда доступны.

В данной работе описана программа, свободная от вышеуказанных недостатков. В ней использован метод определения оптических констант, который был предложен в работе [3]. Похожий, но другой метод изложен в работе [5]. Программа *GLOBAL* определяет оптические константы задаваемые в программах геометрической реконструкции *HYDRA* и *THRESH* и предназначена для трековых камер с известными характеристиками промежуточных оптических сред.

Описание программы

В программе *GLOBAL* предполагается, что исследуемая система фотографирования описывается набором из $11 \cdot N_k$ оптических параметров (N_k - число фотокамер), который включает в себя [4]

- $\vec{x}_3^{(k)} = (x_3, y_3, z_3)^{(k)}$ - координаты входных зрачков объективов (k - номер объектива);
- $f^{(k)}$ - расстояния от входных зрачков до плоскостей пленок;
- $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7)^{(k)}$ - параметры дисторсий.

Кроме того в программе подбираются вспомогательные параметры преобразований из систем координат тест-объектов в камерную. Если при съемках положение тест-объектов не менялось относительно объективов, то достаточно в данном случае

определить 9 параметров преобразований, которые будут общими для всех фотокамер.

Для получения экспериментальных данных используются следующие тест-объекты: \angle^{-3}_j

- система нитей-отвесов, параллельных главным оптическим осям объективов (см. рис.1);
- плита с реперной плоскостью, которая располагается перпендикулярно оптическим осям и фотографируется в двух положениях, различающихся по высоте.

Взаимопараллельность отвесов и оптических осей, а также перпендикулярность последних реперным плоскостям достаточно обеспечить с точностью не хуже 10^{-3} рад. выставлением плоскостей прижимных стекол фотокамер и реперной плиты по горизонтали с помощью слесарных уровней. Здесь предполагается, что главные оптические оси объективов нормальны плоскостям прижимных стекол.

Программа включает в себя 10 подпрограмм, работой которых управляет главная программа *GLOBAL*. В управляющей программе первоначально должно задаваться

- число фотокамер (*ICAM*);
- количество фотографируемых нитей отвесов (*NPC*);
- число меток на реперной плоскости (*NPP*);
- число меток на прижимных стеклах (*NFP*);

Затем следует чтение следующей экспериментальной информации:

- измеренные в собственных системах отсчета ($T_{1,2,3}$ -системы) координаты $\vec{X}_{jT} = (X_j, Y_j)_T$ нитей-отвесов, а также координаты меток на реперной плоскости, которая фотографируется на двух высотах;

- разность высот реперных плоскостей RZ ;
- измеренные в камерной системе* (В-система) координаты $\vec{X}_{P_B} = (X_P, Y_P)_B$ меток на прижимных стеклах;
- измеренные на снимках в системе измерительного прибора (М-система) координаты $\vec{x}_{P_M} = (x_P, y_P)_M$ изображений меток на прижимных стеклах;
- измеренные на снимках в М-системе координаты $x_{ij_M} = (x_{ij}, y_{ij})_M$ точек на концах изображений нитей, а также координаты изображений меток на реперных плоскостях;
- ошибки соответствующих измерений $\sigma_{\vec{x}_T}, \sigma_{\vec{x}_M}, \sigma_{RZ}, \sigma_{\vec{x}_P}, \sigma_{\vec{x}_P}$.

Первым этапом обсчета является определение параметров преобразований координат изображений из М-систем каждого из снимков в единую В-систему. Для каждой из фотокамер процедура начинается с вызова подпрограммы *MFC*, в которой подготавливаются данные для подпрограмм минимизации: число искоемых параметров (*N1*), их начальные значения $A(I)$, пределы приращений в первой итерации $B(I)$, максимальное число итераций (*N3*), шаг печатаемой итерации (*ITER*), параметр *EPS*, задающий выход по точности из минимизации, число дроблений приращений в одной итерации (*N2*).

Процедура подгонки начинается с обращения к подпрограмме *MILIF*, которая по существу идентична с известной программой минимизации *FUMILI*. Вид функционала и производные по параметрам задаются в подпрограмме *PREST*. Здесь исходной информацией служат \vec{X}_{P_B} -координаты меток на прижимном стекле и измеренные \vec{x}_{P_M} -координаты их изо-

* Здесь предполагается, что камерная система задана метками на прижимных стеклах. Она может быть задана также метками внутреннего ориентирования в случае жесткого фиксирования камеры относительно оптической системы.

бражений. Для оценки значений параметров ξ , η , φ ориентации М-системы относительно камерной подготавливается функционал вида:

$$\chi^2 = W \sum_{j=1}^{N_p} [F_{1j}^2 + F_{2j}^2]; \quad (1)$$

$$F_{1j} = (x_{j_p} - \xi) \cdot \cos \varphi + (y_{j_p} - \eta) \cdot \sin \varphi - X_{j_p};$$

$$F_{2j} = -(x_{j_p} - \xi) \cdot \sin \varphi + (y_{j_p} - \eta) \cdot \cos \varphi - Y_{j_p};$$

$$W = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{\vec{x}_p}^2 + \sigma_{\vec{y}_p}^2}}.$$

Здесь N_p - число меток на прижимном стекле, W - весовой множитель, $\sigma_{\vec{x}_p}$, $\sigma_{\vec{y}_p}$ - ошибки измерений. Предполагается, что линейные деформации фотоматериалов пренебрежимо малы. Минимизацией функционала (1) с помощью группы подпрограмм *MILIF* находятся параметры преобразований $M \rightarrow B$ для всех снимков с каждой из фотокамер. Погрешности найденных параметров при достаточной статистической обеспеченности определяются в основном погрешностями $\sigma_{\vec{x}_p}$, $\sigma_{\vec{y}_p}$ измерений на прижимных стеклах и снимках. Отметим, что в случае задания камерной системы с помощью меток на прижимных стеклах, вклад погрешностей параметров $\vec{A}_{M \rightarrow B} = (\xi, \eta, \varphi)_{M \rightarrow B}$ может оказаться существенным при определении остальных оптических констант.

После того, как для каждого из снимков подобраны параметры $\vec{A}_{M \rightarrow B}$, в основной программе производится перевод координат изображений в камерную систему:

$$\vec{x}_B = \hat{G} (\vec{x}_M - \vec{\xi}_{M \rightarrow B}); \quad \hat{G} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix};$$

$$\vec{x}_{M,B} = (x, y)_{M,B}; \quad \vec{\xi}_{M \rightarrow B} = (\xi, \eta)_{M \rightarrow B}.$$

Для преобразования экспериментальных данных из одной системы в другую используются подпрограммы *TRANS* и *RETRAN*.

Процедура определения остальных оптических констант начинается с вызова подпрограммы *OCONST*, в которой аналогично *MFC* подготавливаются данные для подпрограмм минимизации. Минимизируемый функционал и производные по параметрам подготавливаются в подпрограмме *GLOMIN*. Здесь координаты \vec{X}_T предварительно переводятся из Т-систем тест-объектов в единую В-систему с помощью параметров преобразований $\vec{A}_{T \rightarrow B} = (X_0, Y_0, \Psi_0)_{T \rightarrow B}$, которые в дальнейшем определяются вместе с остальными константами. Указанные преобразования имеют вид:

$$\vec{X}_B = \hat{C} (\vec{X}_T - \vec{X}_0); \quad \hat{C} = \begin{pmatrix} \cos \Psi_0 & \sin \Psi_0 \\ -\sin \Psi_0 & \cos \Psi_0 \end{pmatrix};$$

$$\vec{X}_{T,B} = (X, Y)_{T,B}; \quad \vec{X}_0 = (X_0, Y_0).$$

Минимизируемый функционал представляется как

$$J^2 = \sum_k \left\{ \sum_{ij} \left(\frac{F_1^{(k)}}{G_{F_1}} \right)_{ij}^2 + \sum_{n,e} \left[\left(\frac{F_2^{(k)}}{G_{F_2}} \right)_{n,e}^2 + \left(\frac{F_3^{(k)}}{G_{F_3}} \right)_{n,e}^2 \right] \right\} \quad (2)$$

Здесь выражения для $F_{1,2,3}$, полученные в работе [3], имеют вид:

$$F_{1ij} = \frac{(x_{ij} - x_3) \cdot (Y_j - y_3) - (y_{ij} - y_3) (X_j - x_3) - \beta_7 \cdot (x_{ij} - x_3)^3 / f^2}{\sqrt{(X_j - x_3)^2 + (Y_j - y_3)^2}}; \quad (3)$$

$$F_{2n,e} = \frac{f}{Z_n} X_{n,e} - x(\vec{A})_{n,e}; \quad F_{3n,e} = \frac{f}{Z_n} Y_{n,e} - y(\vec{A})_{n,e};$$

$$x(\vec{A})_{n,e} = D \cdot x_{n,e}; \quad y(\vec{A})_{n,e} = D y_{n,e} + \beta_7 \cdot \frac{f}{Z_n} x_{n,e};$$

$$D = 1 + \beta_1 x_{n,e} + \beta_2 y_{n,e} + \beta_3 x_{n,e} y_{n,e} + \beta_4 x_{n,e}^2 + \beta_5 y_{n,e}^2 + \beta_6 (x_{n,e}^2 + y_{n,e}^2)^2.$$

В функционале k - индекс фотокамеры; i - индекс точки на изображении нити; j - индекс нити; $n = 1$ или 2 в зависимости от высоты реперной плоскости; l - индекс реперной метки; f - фокусное расстояние; z_n - высота фотографирования; $\beta_1 \div \beta_7$ - параметры дисторсий; $\sigma_{F_{1,2,3}}$ - ошибки. Отметим, что при условиях $\frac{1}{\lambda} \sigma_{\vec{x}} \ll \sigma_{\vec{x}}$ и $\frac{1}{\lambda} \sigma_{Rz} \ll \sigma_{\vec{x}}$ (λ - средний масштаб съемки), с точностью до величин более высокого порядка малости можно принять $\sigma_{F_{1,2,3}} \approx \sigma_{\vec{x}}$. Это позволяет в значительной степени улучшить подгонку за счет исключения подбираемых параметров из весовых множителей. При записи функционала в виде (2) число степеней свободы J^2_{\min} определяется как

$$p = 2N_k \cdot (2N_l + N_H + N_B) - N_A$$

где N_k - число фотокамер, N_l - число нитей, $N_{H,B}$ - число меток на двух реперных плоскостях, N_A - число искомым параметров.

Минимизация функционала (2) заканчивается при достижении заданной точности и на распечатку выводятся подобранные для всех фотокамер значения $11 \cdot N_k$ оптических констант, 9 вспомогательных параметров преобразований систем координат, а также соответствующие погрешности. Кроме того печатается значение J^2 в последней итерации и другая информация, позволяющая оценить степень достигнутого минимума.

Подобранные оптические параметры должны вводиться в программу геометрической реконструкции HYDRA в виде информации для блоков CAMERA (координаты входных зрачков объективов) и CORREC (параметры дисторсий).

Программа *GLOBAL* написана на языке ФОРТРАН для ЭВМ типа ЕС, все расчеты приводятся с двойной точностью.

Исследование работы программы

Прямая проверка работы программы была проведена на математической модели системы фотографирования стримерной камеры установки "Резонанс". Группа подпрограмм, с помощью которых осуществлялось моделирование съемки и розыгрыш ошибок измерений методом Монте-Карло, вводилась в *GLOBAL* в виде автономного функционального узла. Используемые в расчетах характеристики оптической системы и тест-объектов, а также значения подобранных и заложенных при моделировании оптических констант подробно рассмотрены в [3].

Моделированный числовой материал, полученный варьированием характеристики оптики и тест-объектов, позволил исследовать зависимость подгонки параметров от различных факторов. Результаты проведенного исследования использованы при проектировании объемного тест-объекта, а также для оптимизации как метода определения констант, так и алгоритма программы. Полученные результаты сводятся в основном к следующему:

1. функционал (2) имеет достаточно малую чувствительность к выбору начального приближения. Устойчивость подгонки сохраняется при выборе начальных значений параметров, отличающихся от заданных при моделировании более чем на 100%.
2. Программа позволяет независимо определить координаты x_3 , y_3 входных зрачков фотокамер минимизацией парциального функционала F_1 из выражения (2).
3. Исследована зависимость точностей определения констант от объема экспериментальных данных. На рис.2 в качестве

примера представлен график зависимости погрешностей

σ_{x_3, y_3} от числа нитей-отвесов тест-объекта. Рис.3 иллюстрирует зависимость ошибок σ_{z_3} в определении z -координат входных зрачков от числа меток на реперной плоскости.

4. Показано, что погрешности параметров f, x_3, y_3, z_3 линейно зависят от длины изображений нитей на снимке, что согласуется с оценками работы [4], где указывалось, что погрешности указанных констант должны быть обратно-пропорциональными разности масштабов фотографирования. Отсюда следует, что длина фотографируемых нитей должна быть настолько большой, насколько позволяет глубина резкости объективов.
5. Значения σ_{x_3} оказываются слабо зависящими от взаимного расположения оптической осей объективов и фотографируемых нитей. Например, с увеличением размеров тест-объекта изображения нитей несколько удлиняются, однако с удалением их от центра снимка соответственно растут, обусловленные ошибками измерений, отклонения продолжений отрезков от главной точки снимка.
6. Объемный тест-объект, представляющий собой систему нитей-отвесов, в принципе позволяет определять все оптические константы без применения плиты с реперными метками, для чего необходимо измерить длины фотографируемых нитей с точностью $\frac{1}{\lambda} \sigma_{\Delta z} \ll \sigma_{x_3}$, где σ_{x_3} - ошибки измерений на снимке.

В заключение авторы выражают признательность В.Ф.Вишневному, Р.Ледницкому и С.С.Шиманскому за полезные обсуждения, а также Г.А.Глухову за помощь в работе.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. TC Program Library, CERN, 1968, vol. 1, 2, 3.
2. Мельниченко И.А. и др. Препринт ИТЭФ, М., 1977, № 120.
3. Алиев Ф.К. и др. Сообщение ОИЯИ, 13-81-333, Дубна, 1981.
4. Ледницкий Р. и др., Депонированная публикация ОИЯИ, Б2-10-7737, Дубна, 1974.
5. Козубский Э.В. Депонированное Сообщение ОИЯИ, Б2-1183, Дубна, 1962.

Алиев

Козубский

Беленкин

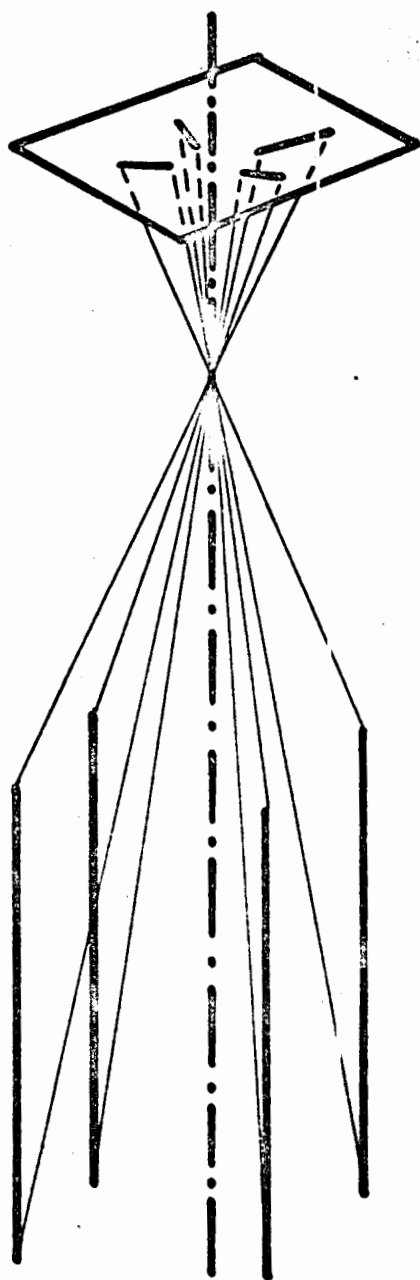


Рис.1. Фотографирование нитей-отвесов, параллельных главной оптической оси объектива.

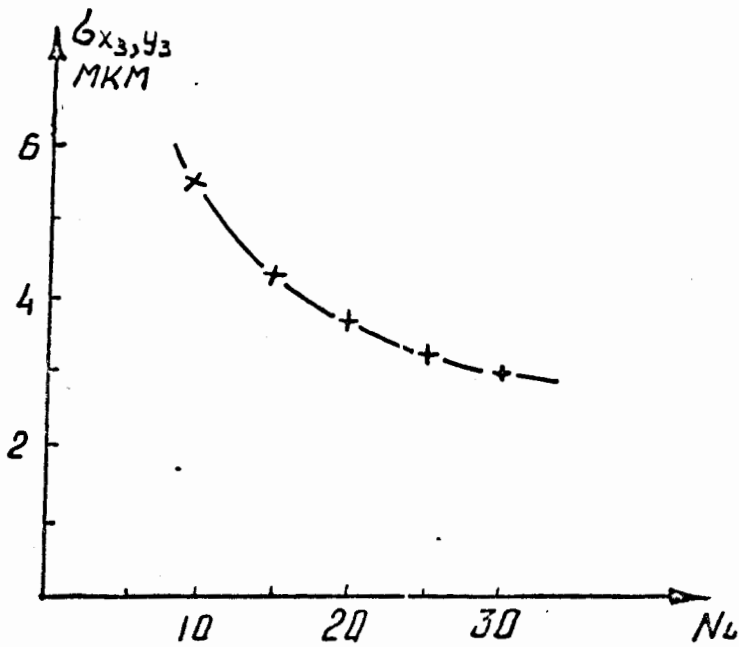


Рис.2. Зависимость погрешностей σ_{x_3, y_3} от числа фотографируемых нитей-отвесов.

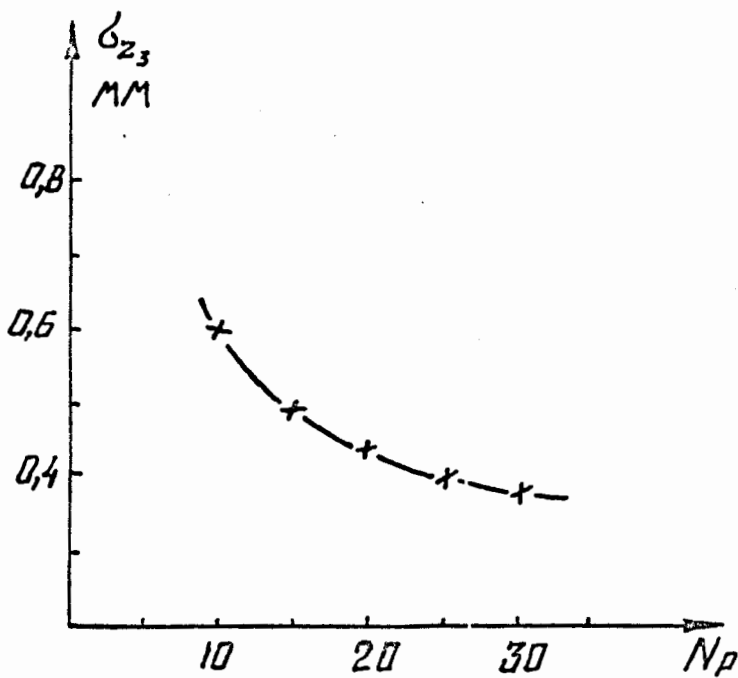


Рис.3. Зависимость погрешностей σ_{z_3} от числа меток на реперной плоскости.