

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

4426 / 2-81

31/8-81

13-81-333

+

Ф.К.Алиев, А.А.Аскарходжаев, В.Ф.Вишневский

ПРОСТОЙ МЕТОД
ТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТАНТ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ
ТРЕКОВЫХ КАМЕР

1981

Материалы и оборудование для фотографирования следов частиц в трековых камерах, обработка пленки и измерения следов на снимках к настоящему времени усовершенствованы и отработаны настолько, что ожидать их существенного улучшения, а вместе с ним и уменьшения статистических ошибок, по-видимому, уже нет оснований. Поэтому точности воспроизведения событий в пространстве по измерениям следов частиц на снимках можно увеличивать только за счет уменьшения ошибок систематических, разумеется, до некоторого предела, когда систематические ошибки снижаются настолько, что точности определяются практически только статистическими ошибками.

Из всех возможных источников систематических ошибок основным, по-видимому, являются неточности определения констант оптической системы фотографирования. В принципе, используя, например, программу PYTHON^{1/1} и специальные устройства для точных перемещений реперной плиты для тестовых съемок^{1/2/}, их можно определить с необходимой точностью, однако такие устройства слишком сложны в изготовлении и дороги, поэтому далеко не всегда доступны. Ниже описывается метод определения оптических констант, позволяющий получать высокие точности относительно простыми средствами.

В стандартных программах HYDRA и THRESH, с помощью которых события в трековых камерах восстанавливаются в пространстве по измерениям следов частиц на снимках, используются, в частности, следующие константы, характеризующие оптическую систему фотографирования: координаты входных зрачков объективов $\vec{x}_3 = (x_3, y_3, z_3)^{(k)}$, расстояния от выходных зрачков до пленки $f^{(k)}$ и параметры дисторсий объективов $\beta_1^{(k)}, \beta_2^{(k)}, \dots, \beta_7^{(k)}$, где k - номер фотокамеры.

В программе PYTHON^{1/1} и в близких к ней по подходу других программах методика определения указанных констант по существу сводится к минимизации функционала типа

$$\chi^2 = \sum_{i,k} \left(\frac{\vec{x}_i^k(\tilde{A}) - \vec{x}_i^k}{\sigma} \right)^2, \quad //1/$$

где \vec{x}_i^k - координаты изображений реперных меток, вычисленные в предположении, что оптика идеальна, а $\vec{x}_i^k(\tilde{A})$ - измеренные на пленке реальные координаты, подвергнутые преобразованиям, соответствующим переходу к координатам, которые имели бы место в случае идеальной оптики^{1/1}. Преобразования осуществля-

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ

ются на основе параметров $\vec{A} = (\vec{x}_3, f, \beta_1, \dots, \beta_7)^{(k)}$ по формулам:

$$\vec{t} = (t_x, t_y); \quad t' = -\frac{1}{f}(\vec{x}' - \vec{x}_3); \quad /2/$$

$$t_x = Dt'_x; \quad t_y = Dt'_y + \beta_7 t'^2_x z_3;$$

$$D = 1 + \beta_1 t'^2_x + \beta_2 t'^2_y + \beta_3 t'_x t'_y + \beta_4 t'^2_x + \beta_5 t'^2_y + \beta_6 (t'^2_x + t'^2_y)^2,$$

где f - расстояние от выходного зрачка до плоскости снимка.

Такой способ определения оптических констант предусматривает фотографирование реперных меток на двух плоскостях, расположенных на разных расстояниях по оси z , параллельной оптическим осям объективов. При этом координаты X, Y меток на этих плоскостях должны быть измерены в единой системе с точностями, обусловленными неравенством

$$\frac{1}{\bar{a}} \sqrt{\sigma_{\vec{X}}^2 + (\vec{X}_H - \vec{X}_B)^2} \ll \sigma_{\vec{X}}. \quad /3/$$

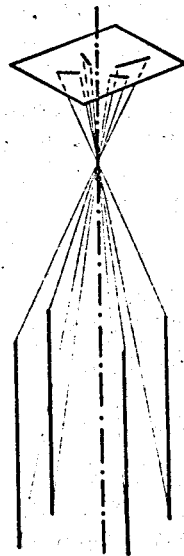
Здесь \bar{a} - средний масштаб фотографирования, $\sigma_{\vec{X}}$ - ошибка измерений координат меток на реперных плоскостях, $\vec{X}_H = (X_H, Y_H)$ и $\vec{X}_B = (X_B, Y_B)$ - координаты меток на нижней и верхней плоскостях, $\sigma_{\vec{X}}$ - ошибка измерений точек на снимках.

Если координаты меток измерены в разных системах отсчета, то, как показано в работе ^{/3/}, для определения констант получаемых линейно-независимых уравнений недостаточно. В этом случае необходимо предварительно задать координаты входных зрачков $(x_3, y_3)^{(k)}$.

Если сфотографирована только одна реперная плоскость, должны быть заданы координаты входных зрачков и фокусные расстояния.

Для камер с известными характеристиками промежуточных оптических сред константы можно получить также в том случае, если сфотографировать одну и ту же реперную плоскость на двух разных высотах. При этом, чтобы выполнить условия /3/, необходимо подъемное устройство для перемещения плиты с реперной плоскостью вдоль оптической оси объективов, такое, чтобы координаты X, Y реперных отметок на разных высотах совпадали с высокой точностью ^{/2/}. Затруднение в данном случае вызывается сложностью изготовления такого устройства и его высокой стоимостью.

Выше было отмечено, что жесткое требование /3/ к взаимной ориентации реперных плоскостей можно обойти, если координаты входных зрачков $(x_3, y_3)^{(k)}$ определить независимо. С высокой точностью и относительно просто это можно сделать по снимкам достаточно большого количества нитей, натянутых параллельно



оптическим осям объективов. Такие нити на снимках будут представляться в виде системы отрезков, направленных на оптические оси /см. рисунок/. Координаты точек, в которых сходятся продолжения этих отрезков, и, следовательно, точек, в которых оптические оси пересекают плоскости снимков, нетрудно вычислить на основе измерений точек на отрезках.

Параллельность нитей и оптических осей можно обеспечить, если, в частности, фотографировать нити отвесов, расположив фотоаппарат так, чтобы оси были направлены по вертикали. Сделать это нетрудно, учитывая, что оптические оси направлены по нормали к поверхностям стекол, к которым прижимаются пленки при фотографировании. Расположить их по горизонтали, а оси по вертикали можно с помощью достаточно точных уровней. Нити подвесов желательно закрепить на кольце на одинаковом между ними расстоянии. Длина нитей должна соответствовать глубине резкости фотографирования.

Прямые, пересекающиеся в точке, в которой ось проходит через плоскость снимка, могут быть описаны N уравнениями

$$f_j = (x_{ij} - x_3) \sin \psi_j - (y_{ij} - y_3) \cos \psi_j = 0. \quad /4/$$

Здесь x_{ij}, y_{ij} - координаты точек на концах j -го отрезка в камерной системе*, x_3, y_3 - координаты оси, ψ_j - угол между направлением j -го отрезка и осью абсцисс.

Свойства центрированной оптики дают возможность исключить из уравнений параметры ψ_j с помощью координат отвесов X_{ij} и Y_{ij} , измеренных в собственной системе тест-объекта и преобразованных в камерную систему:

$$\cos \psi_j = \frac{X_j}{R_j}; \quad \sin \psi_j = \frac{Y_j}{R_j}; \quad R_j = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2};$$

$$\vec{X}_j = \hat{G}(X_{ij}, Y_{ij}).$$

где $\vec{X}_j = (X_j, Y_j)$ - координаты отвесов в камерной системе; \hat{G} - матрица перевода, содержащая три параметра преобразования из системы тест-объекта в камерную.

* Камерная система может быть задана метками внутреннего ориентирования, а в случае их отсутствия - единой системой, фиксируемой реперными метками на прижимных стеклах фотокамер.

В таком случае уравнения /4/ запишутся в виде

$$f_j = \frac{(x_{ij} - x_3)(Y_j - y_3) - (y_{ij} - y_3)(X_j - x_3)}{\sqrt{(X_j - x_3)^2 + (Y_j - y_3)^2}} \quad /5/$$

Далее, используя стандартные соотношения /2/, заменим координаты x_{ij}, y_{ij} в уравнении /5/ на реально измеренные координаты x'_{ij}, y'_{ij} точек на снимке:

$$f_j^* = \frac{(x'_{ij} - x_3)(Y_j - y_3) - (y'_{ij} - y_3)(X_j - x_3) - \beta_7 (x'_{ij} - x_3)^3 / f^2}{\sqrt{(X_j - x_3)^2 + (Y_j - y_3)^2}} \quad /6/$$

Поскольку в реальных случаях из-за ошибок измерений точек на отрезках продолжения их будут пересекаться в окрестностях главной точки, то для определения координат оси x_3, y_3 необходимо минимизировать функционал вида

$$\chi^2 = \sum_{ij} \left(\frac{f_j^*}{\sigma_{f_j^*}} \right)^2, \quad /7/$$

где $\sigma_{f_j^*}$ - ошибки измерений.

Функционал включает в себя также три параметра преобразования из систем тест-объекта в камерную, фокусное расстояние f и параметр β_7 , учитывающий возможное отклонение луча света от меридиональной плоскости.

Чтобы определить z_3 - координату входного зрачка и остальные константы оптической системы, можно воспользоваться функционалом типа /1/, который предполагает съемку объемного тест-объекта с реперными метками на двух высотах. Отметим, что в данном случае координаты меток на двух высотах могут задаваться в разных системах отсчета. Это важно потому, что позволяет при съемках на стенде использовать намного более простое и соответственно менее дорогое оборудование.

Если при съемке на стенде положение тест-объектов относительно каждой из фотокамер не менялось, то значения всех констант оптической системы фотографирования определяются минимизацией функционала

$$\chi^2 = \sum_k \left[\sum_{ij} \left(\frac{f_j^*(k)}{\sigma_{f_j^*}} \right)^2 + \sum_n \left(\frac{\vec{x}_n^{(k)} - \vec{x}_n^{(k)}(\tilde{A})}{\sigma_{x_n}} \right)^2 + \sum_\ell \left(\frac{\vec{x}_\ell^{(k)} - \vec{x}_\ell^{(k)}(\tilde{A})}{\sigma_{x_\ell}} \right)^2 \right] \quad /8/$$

Здесь k - номер фотокамеры, n, ℓ - индексы меток на верхней и нижней реперных плоскостях.

В функционал /8/, кроме оптических констант, входят 9-параметров преобразований из собственных систем тест-объектов в единую камерную систему. Они являются общими для всех фотокамер.

На основе описанного метода создана программа GLOBAL, предназначенная для определения констант оптической системы фотографирования трековых камер с известными характеристиками про-

межуточных оптических сред. Программа была опробована на числовом материале, полученном методом Монте-Карло, что позволило исследовать влияние различных характеристик тест-объектов и оптической системы на точности определения констант. При моделировании были использованы характеристики системы фотографирования установки "Резонанс" /4/.

Оптическая система фотографирования этой установки содержит четыре фотокамеры с широкоугольными объективами "Мир-1" / $f = 37,4$ мм/. Базы фотографирования равны 310 мм, средний масштаб фотографирования $\bar{a} = 33$. Стримерная камера не связана жестко с оптической головкой, поэтому в рабочем объеме реперные метки отсутствуют. Система отсчета задается реперными метками на четырех прижимных стеклах /8 меток на каждом стекле/. Между рабочим объемом и объективами преломляющих оптических сред нет.

В расчетах предполагалось использование тест-объектов со следующими характеристиками:

1. Кольцо с внутренним диаметром $b = 600$ мм, по которому на равных расстояниях располагаются 24 нити отвесов длиной по 500 мм. Ошибки $\sigma_{x,y} = 20$ мкм.

2. Реперная плита 1300x800 мм, содержащая 24 метки, при фотографировании устанавливается на расстояниях 1000 и 1500 мм от входного зрачка объектива. Разность высот измеряется с точностью $\pm 0,04$ мм.

Реперные метки на плоскости измерены с ошибками $\sigma_{x,y} = 20$ мкм, ошибки измерений точек на снимке $\sigma_{x,y} = 5$ мкм.

В результате обсчета по программе GLOBAL были получены 53 параметра /для четырех фотокамер/, из которых 44 необходимы

Таблица

	$A_{\text{мод}}$	$A_{\text{мод}} \pm \sigma_A$
X_3 (см)	16,4950	16,4952 \pm 0,0003
Y_3	0,0010	0,0011 \pm 0,0003
Z_3	153,00	153,01 \pm 0,04
f	3,8451	3,8456 \pm 0,0010
$\beta_1 \cdot 10^4$	0,0	0,39 \pm 0,40
$\beta_2 \cdot 10^4$	0,0	0,27 \pm 0,45
$\beta_3 \cdot 10^4$	0,30	0,43 \pm 0,19
$\beta_4 \cdot 10^2$	-0,193	-0,192 \pm 0,006
$\beta_5 \cdot 10^2$	-0,193	-0,190 \pm 0,008
$\beta_6 \cdot 10^4$	0,43	0,38 \pm 0,04
$\beta_7 \cdot 10^2$	0,0	0,21 \pm 0,27

для использования программы HYDRA. Для характеристики точностей в качестве примера в таблице приведены значения заданных при моделировании /А мод/ и подобранных ($A_{\text{под}} \pm \sigma_A$) программой оптических констант для одной из фотокамер.

В заключение авторы выражают благодарность Р.Ледницкому, а также С.Ш.Амееву, В.А.Белякову и С.С.Шиманскому за неоднократные, весьма полезные обсуждения и Г.А.Глухову и С.В.Краснослободцевой за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. TC Program Library, CERN, 1968, vol. 1,2,3.
2. Мельниченко И.А. и др. Препринт ИТЭФ, М., 1977, №120.
3. Ледницки Р. и др. ОИЯИ, Б2-10-7737, Дубна, 1974.
4. Вишневский В.Ф. и др. ПТЭ, 1973, №5, с. 57.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 мая 1981 года.