

СЗУУ.1д

22/11-70

1-553

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 5034



Г. Либман, Ж.П. Пустыльник

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

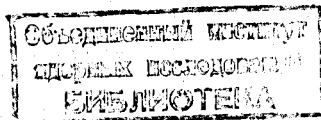
ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ
В ТРЕКОВЫХ ПРИБОРАХ
ПРИ НЕФИКСИРОВАННОМ ПОЛОЖЕНИИ
ФОТОГРАФИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1970

13 - 5034

Г. Либман, Ж.П. Пустыльник

ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ
В ТРЕКОВЫХ ПРИБОРАХ
ПРИ НЕФИКСИРОВАННОМ ПОЛОЖЕНИИ
ФОТОГРАФИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



До сих пор рабочие объемы пузырьковых камер средних размеров фотографировались, как правило, обычными объективами с большого расстояния. При этом визирные линии объективов были направлены строго параллельно друг другу и перпендикулярно к средней плоскости рабочего объема. Стереобазы между отдельными объективами были известны с большой точностью. В разных плоскостях внутри камеры, а иногда и на прижимных стеклах фотоаппаратов находились реперные метки. Используемые в настоящее время программы восстановления пространственных координат /1-7/ основаны на этих предпосылках.

В многометровых камерах, наоборот, применяются широкоугольные объективы, направленные внутрь камеры под разными углами. Фотоаппараты крепятся непосредственно к корпусу камеры, изменяющей свои размеры при охлаждении и нагреве, а также под влиянием пульсирующего давления рабочей среды, в результате чего положение фотоаппаратов во время работы камеры постоянно меняется. Непостоянство размеров камеры вызывает также трудности при осуществлении сложной системы реперных меток внутри камеры. Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос о наименьшем количестве реперов, позволяющем провести восстановление пространственных координат, и целесообразном расположении их.

Большая дисторсия, как правило, свойственная широкоугольным объективам, легче всего учитывается в процессе восстановления, когда на пленке отмечен центр кадра, т.е. точка прохождения визирной линии через плоскость пленки. В таком случае, как станет видно в дальнейшем, достаточно иметь три или четыре репера внутри камеры, чтобы для каждого снимка определять соответствующее положение узловых точек или зрачков объектива. Реперы должны быть расположены в одной плоскости. Они определяют координатную систему в пространстве камеры. Для простоты мы предполагаем в дальнейшем, что объективы являются идеальными и что зрачки и узловые точки их совпадают.

Для того, чтобы сохранить во время работы камеры взаимное расположение реперов, можно использовать лазерные лучи, как показано на рис. 1. Лазеры $L_1 + L_4$ размещены на отдельных стойках вне камеры и поэтому не участвуют в движениях камерного корпуса. Лучи можно пропускать внутрь рабочего объема камеры между двумя катушками магнита. На рис. 1 лазерные лучи образуют квадрат или прямоугольник с четырьмя углами $Q_1 + Q_4$, служащими реперными точками. Юстировку лучей можно осуществить с помощью пентапризмы и коллимационной трубы. Для облегчения юстировки точки $Q_1 + Q_4$ находятся под иллюминаторами камеры и поэтому являются легко доступными. Применение лазерных лучей в качестве реперов имеет еще одно преимущество, состоящее в том, что лазерные лучи не оказывают влияния на движение рабочей среды и не ограничивают возможности полного освещения рабочего объема камеры.

Можно было бы отказаться от реперных меток на прижимных стеклах фотоаппаратов. Но в таком случае необходимо было бы иметь метки в двух плоскостях внутри камеры, что значительно увеличило бы технические трудности и уменьшило бы точность определения координат узловых точек фотообъективов.

В отличие от использованных до сих пор программ пространственного восстановления/1,4,6/ наша программа не дает возможности сразу перейти от координат, измеренных на пленке, к координатам фотографической системы, потому что стереобазы и наклоны визирных линий объекти-

вов пока неизвестны. Поэтому необходимо сначала определить координаты узловых точек и направления визирных линий в пространстве X, Y, Z .

Четыре репера $Q_1 \div Q_4$ изображаются на пленке одного из фотоаппаратов в точках ${}_n q_1 ({}_n x_1, {}_n y_1) - {}_n q_4 ({}_n x_4, {}_n y_4)$, которые образуют нерегулярный четырехугольник. Предположим, что координаты ${}_n x, {}_n y$ уже содержат поправки на дисторсию объектива и усадку пленки. Определение положения узловой точки начнем с перехода от координатной системы ${}_n x, {}_n y$ к системе ${}_p x, {}_p y$, параллельной плоскости X, Y . Для этого необходимо поворачивать плоскость ${}_n x, {}_n y$ на угол α вокруг оси g , образующей с осью ${}_n x$ угол β (см. рис. 2). При правильном положении плоскости ${}_p x, {}_p y$ точки ${}_p q_1 \div {}_p q_4$ должны образовать квадрат или прямоугольник, подобные прямоугольнику, образованному реперами $Q_1 \div Q_4$. Как известно, в условиях центральной проекции такой поворот описывается проективным преобразованием:

$$\begin{aligned} {}_p x &= \frac{a_1 \cdot {}_n x + b_1 \cdot {}_n y + c_1}{a_0 \cdot {}_n x + b_0 \cdot {}_n y + c_0}, \\ {}_p y &= \frac{a_2 \cdot {}_n x + b_2 \cdot {}_n y + c_2}{a_0 \cdot {}_n x + b_0 \cdot {}_n y + c_0}. \end{aligned} \quad (1)$$

Благодаря присутствию на прижимном стекле реперной метки, служившей началом координат для систем ${}_n x, {}_n y$ и ${}_p x, {}_p y$, является возможность выразить коэффициенты $a_0 + c_2$ через углы α и β следующим образом:

$$a_0 = -\frac{1}{f} \sin \alpha \sin \beta,$$

$$b_0 = \frac{1}{f} \sin \alpha \cos \beta,$$

$$c_0 = \cos \alpha,$$

$$a_1 = \cos \alpha \cos \beta,$$

$$b_1 = \cos a \sin \beta,$$

$$c_1 = 0,$$

$$a_2 = -\sin \beta,$$

$$b_2 = \cos \beta,$$

(2)

$$c_2 = 0,$$

где f — так называемое фотограмметрическое фокусное расстояние — является известной величиной.

Значения углов a и β получим из условия, что точки $p x_1, p y_1$ должны образовать четырехугольник с параллельными сторонами:

$$\operatorname{tg} a = \frac{B \cdot f}{C \cdot \cos \beta + E \cdot \sin \beta},$$

(3)

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{A \cdot C - B \cdot D}{A \cdot E - B \cdot F},$$

где

$$A = (y_{n1} - y_{n4})(x_{n3} - x_{n2}) - (x_{n1} - x_{n4})(y_{n3} - y_{n2}),$$

$$B = (y_{n4} - y_{n3})(x_{n2} - x_{n1}) - (x_{n4} - x_{n3})(y_{n2} - y_{n1}),$$

$$C = (y_{n4} - y_{n3})(y_{n2} \cdot x_{n1} - x_{n2} \cdot y_{n1}) - (y_{n2} - y_{n1})(y_{n4} \cdot x_{n3} - x_{n4} \cdot y_{n3}),$$

$$D = \begin{pmatrix} n_1 y_1 - n_4 y_4 \\ n_3 y_3 - n_2 y_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_3 x_2 - n_2 x_1 \\ n_1 x_4 - n_4 x_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} n_3 y_3 - n_2 y_2 \\ n_1 y_1 - n_4 y_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 x_4 - n_4 x_3 \\ n_3 x_2 - n_2 x_1 \end{pmatrix},$$

$$E = \begin{pmatrix} n_4 x_4 - n_3 x_3 \\ n_2 x_2 - n_1 x_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_2 y_1 - n_1 y_2 \\ n_4 y_3 - n_3 y_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} n_2 x_2 - n_1 x_1 \\ n_4 x_4 - n_3 x_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_4 y_3 - n_3 y_4 \\ n_2 y_1 - n_1 y_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$F = \begin{pmatrix} n_1 x_1 - n_4 x_4 \\ n_3 x_3 - n_2 x_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_3 y_2 - n_2 y_3 \\ n_1 y_4 - n_4 y_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} n_3 x_3 - n_2 x_2 \\ n_1 x_1 - n_4 x_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 y_4 - n_4 y_1 \\ n_3 y_2 - n_2 y_3 \end{pmatrix}.$$

Углы α и β определяются однозначно, если координатная система n_x, n_y выбрана таким образом, что α и β лежат в пределах от -90° до $+90^\circ$.

Следующим шагом является переход к координатам фотографической системы, т.е. к координатам x_c, y_c , параллельным осям X и Y . Начало этой системы находится над узловой точкой (см. рис. 3):

$$x_c = p_x \cos \gamma - (p_y - f \cdot \sin \alpha) \sin \gamma, \quad (5)$$

$$y_c = p_x \cdot \sin \gamma + (p_y - f \cdot \sin \alpha) \cos \gamma.$$

Угол γ может принимать любое значение от 0° до 360° . Поэтому целесообразно определить непосредственно значения $\sin \gamma$ и $\cos \gamma$. Как видно из рис. 3, имеем равенства:

$$\sin \gamma = \frac{p_y y_3 - p_y y_1}{\sqrt{(p_x x_3 - p_x x_1)^2 + (p_y y_3 - p_y y_1)^2}}, \quad (6)$$

$$\cos \gamma = \frac{p_x x_3 - p_x x_1}{\sqrt{(p_x x_3 - p_x x_1)^2 + (p_y y_3 - p_y y_1)^2}}.$$

Далее из рассмотрения подобных треугольников на рис. 3 можно найти координаты узловых точек:

$$\begin{aligned} X_N &= A \frac{c^x_1}{c^x_1 - c^x_3}, \\ Y_N &= A \frac{c^y_1}{c^x_1 - c^x_3}, \\ Z_N &= A \frac{\Gamma \cos \alpha}{c^x_1 - c^x_3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, мы знаем теперь координаты узловой точки для данного объектива и направление визирной линии, которое определяется углами α и γ . Так как на камере имеется несколько объективов, в дальнейшем следует ввести еще один индекс, обозначающий номер объектива. Мы поставим его слева сверху от обозначения координат.

Произведя преобразования (1) и (6) со всеми измеренными координатами, можно продолжить обработку данных по прежним программам, учитывая, однако, что значения Z_N для разных объективов неодинаковы.

С целью проверки практической годности полученных соотношений по ним вычислялись координаты узловых точек, а также пробной точки P , находящейся внутри рабочего объема камеры.

В последнем случае сначала были определены проекции 1P , 2P точки P на плоскость X, Y , как показано на рис. 4.

$$\begin{aligned} {}^1X_P &= A \frac{{}^1c^x_1 - {}^1c^x_P}{{}^1c^x_1 - {}^1c^x_3}; & {}^2X_P &= A \frac{{}^2c^x_1 - {}^2c^x_P}{{}^2c^x_1 - {}^2c^x_3}. \\ {}^1Y_P &= A \frac{{}^1c^y_1 - {}^1c^y_P}{{}^1c^x_1 - {}^1c^x_3}; & {}^2Y_P &= A \frac{{}^2c^y_1 - {}^2c^y_P}{{}^2c^x_1 - {}^2c^x_3}. \end{aligned} \quad (8)$$

Через проекции ${}^1P, {}^2P$ и через узловые точки проводились две прямые, точка пересечения которых являлась искомой точкой P с координатами:

$$X_P = \frac{{}^2X_P {}^2Z_N ({}^1X_P - {}^1X_N) - {}^1X_P {}^1Z_N ({}^2X_P - {}^2X_N)}{{}^2Z_N ({}^1X_P - {}^1X_N) - {}^1Z_N ({}^2X_P - {}^2X_N)},$$

$$Y_P = \frac{{}^2Y_P {}^2Z_N ({}^1Y_P - {}^1Y_N) - {}^1Y_P {}^1Z_N ({}^2Y_P - {}^2Y_N)}{{}^2Z_N ({}^1Y_P - {}^1Y_N) - {}^1Z_N ({}^2Y_P - {}^2Y_N)}, \quad (9)$$

$$Z_P = \frac{{}^1Z_N {}^2Z_N ({}^1X_P - {}^2X_P)}{{}^2Z_N ({}^1X_P - {}^1X_N) - {}^1Z_N ({}^2X_P - {}^2X_N)}.$$

Предполагаемые размеры камеры, используемые для численных расчётов, показаны на рис. 1.

Согласно этим размерам с помощью тригонометрических соотношений сначала определялись точные значения координат проекций реперных точек и пробной точки P на пленке, а затем положение изображений точек варьировалось случайным образом в соответствии со случайными ошибками измерительной аппаратуры. При этом использовалась стандартная программа распределения случайных чисел, выданные значения которой были нормированы на среднеквадратичные отклонения $\sigma = 0,002$ мм и $0,005$. Полученные таким образом значения координат x_n, y_n были подставлены затем в формулы (1) + (9).

Результаты определения координат узловой точки фотоаппарата для значения $\sigma = 0,002$ мм показаны на рис. 5. Сто вычисленных значений распределены вокруг действительного расположения узловой точки со среднеквадратичным отклонением $\Delta X_N \approx \Delta Y_N \approx \Delta Z_N \approx 0,48$ мм:

Для среднеквадратичного отклонения $\sigma = 0,005$ мм соответственно получаются значения $\Delta X_N \approx \Delta Y_N \approx \Delta Z_N \approx 1,20$ мм. Как видно, в пределах точности обычной измерительной аппаратуры среднеквадратичные ошибки координат узловых точек являются пропорциональными функциями отклонения σ .

Если учесть, что масштаб изображения фотографической системы доходит для отдельных реперных точек до величины $1 : 100$, то в наилучшем случае можно было бы ожидать отклонения $\Delta X_N \approx 0,2$ мм или $0,5$ мм соответственно. Разница между полученными и ожидаемыми значениями указывает на несовершенство наших формул. Можно, однако, увеличить точность, проведя несколько измерений реперных точек или используя при определении углов α и β , помимо условия параллельности сторон четырехугольника q_1 , условие прямоугольности его.

С помощью найденных таким образом узловых точек двух объективов, диаметрально расположенных относительно друг друга, определялись координаты пробной точки P . При этом опять учитывались случайные отклонения измеренных на пленке координат от действительных значений. Среднеквадратичное отклонение было принято равным $0,002$ мм. Точка P занимала разные положения в пространстве камеры. Результаты этих вычислений приведены в табл. 1. Видно, что среднеквадратические ошибки ΔX , ΔY , ΔZ вычисленных координат пробной точки вполне соответствуют ожидаемому значению $0,2$ мм.

В заключение можно сказать, что для проведения пространственного восстановления в больших трековых приборах, особенно в пузырьковых камерах, рабочий объем которых фотографируется непараллельными фотоаппаратами с нефиксированными во время работы камеры положениями, достаточно иметь три или четыре реперных точки внутри камеры и по одной реперной точке на прижимном стекле каждого фотоаппарата. Предложенный метод обеспечивает достаточную точность при восстановлении пространственных координат как узловых точек объективов, так и пробных точек внутри рабочего объема камеры.

Л и т е р а т у р а

1. Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, Е.Н. Кладницкая, М.И. Соловь-ев. Препринт ОИЯИ, Р-284, Дубна, 1958, стр. 101.
2. В.Вöck, Preprint CERN 60-7, Geneva, 1960.
3. W.G.Moorhead, Preprint CERN 60-33, Geneva, 1960.
4. Г.Н. Тентюкова. Препринт ОИЯИ, 5-3263, Дубна, 1967, стр. 111.
5. М. Posch, А. Sebestyen, F. Telbisz. Препринт ОИЯИ, 5-3263, Дубна, стр. 133.
6. Н.Н. Говорун, Г.А. Емельяненко, Н.Ф. Маркова, В.И. Мороз, В.И. Ники-тина, И.С. Саитов, А.П. Стельмах, Г.Н. Тентюкова. Препринт ОИЯИ, Р11-3480, Дубна, 1967.
7. И.М. Иванченко, Н.А. Круткова, В.И. Мороз, Т.Г. Останевич, Г.Н. Тен-тюкова. ПТЭ №6, 56 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел

8 апреля 1970 года.

Таблица 1

Координаты точек в системе координат камеры (мм)

X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
1060,6602	1060,6602	0,0000	0,1522	0,1747	0,3998
2121,3204	0,0000	0,0000	0,1697	0,1591	0,4130
2474,8738	-353, 5534	0,0000	0,2375	0,2561	0,5379
2651,6505	-530, 3301	0,0000	0,2997	0,3367	0,6345
1060,6602	1060,6602	-500,0000	0,1621	0,1380	0,5012
2121,3204	0,0000	-500,0000	0,2040	0,1936	0,5309
2474,8738	-353,5534	-500,0000	0,2804	0,3032	0,6502
1060,6602	2121,3204	0,0000	0,2304	0,2747	0,5490
1060,6602	2310,6602	0,0000	0,2474	0,2856	0,5850
1060,6602	2935,6602	0,0000	0,3161	0,5632	0,7131
2121,3204	0,0000	1000,0000	0,2256	0,2261	0,3389
2474,8738	-353,5534	750,0000	0,2395	0,2646	0,4699

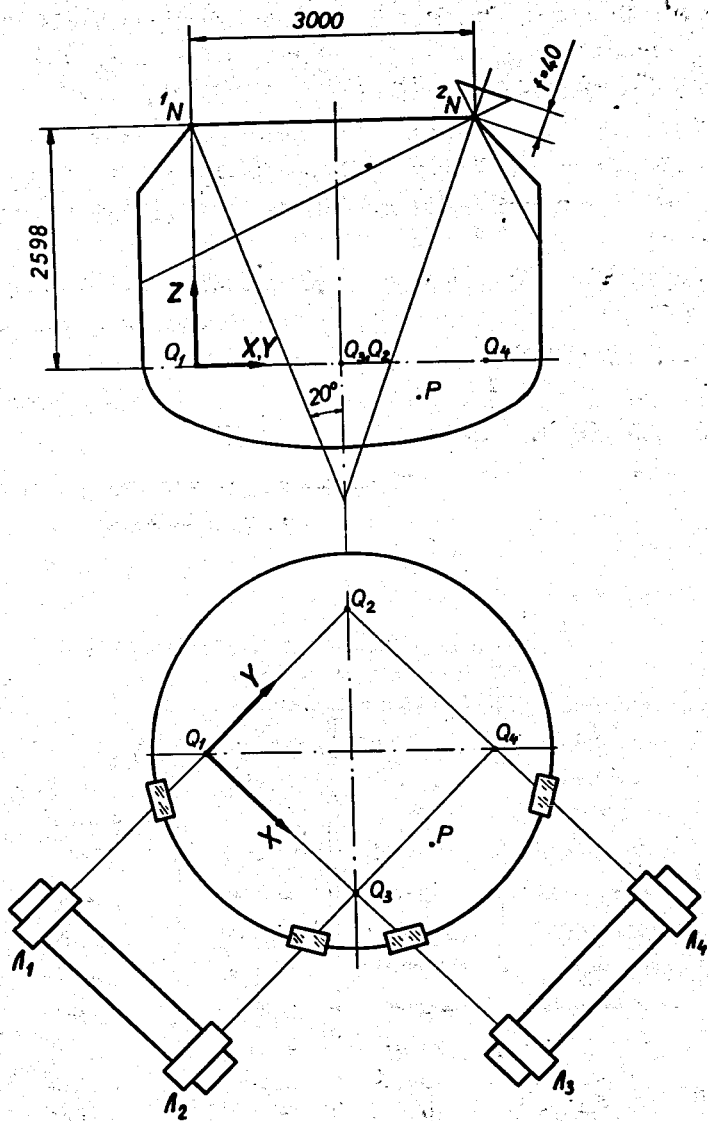


Рис. 1

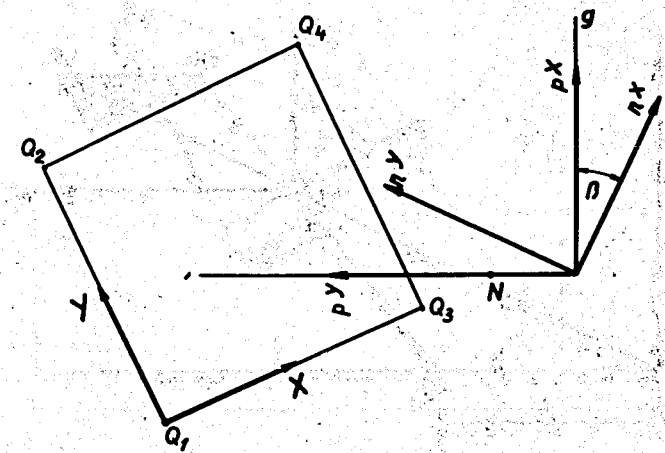
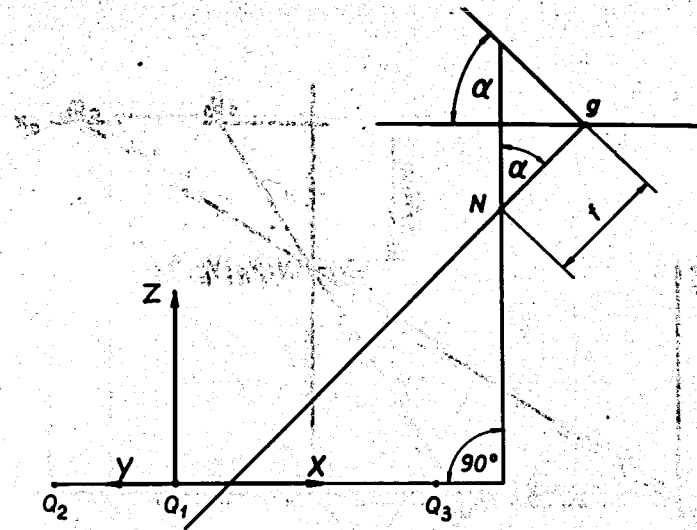
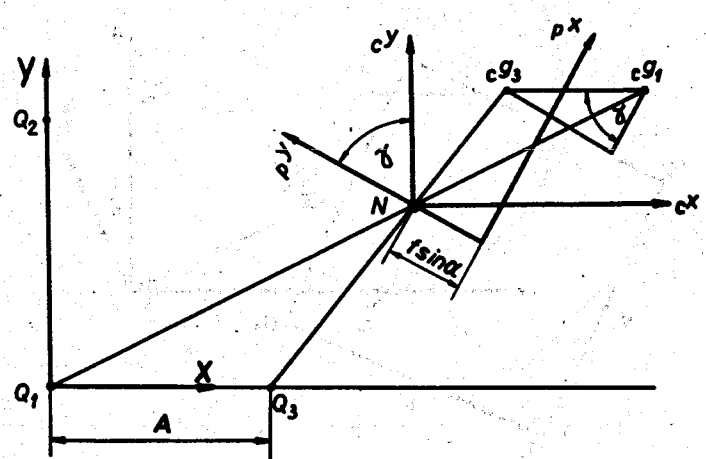
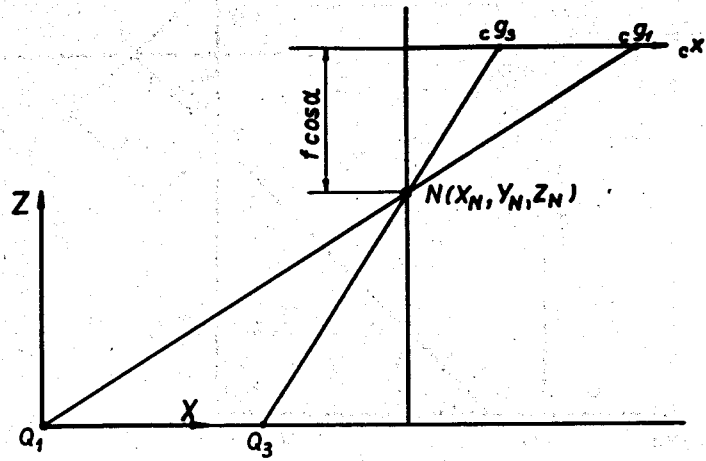
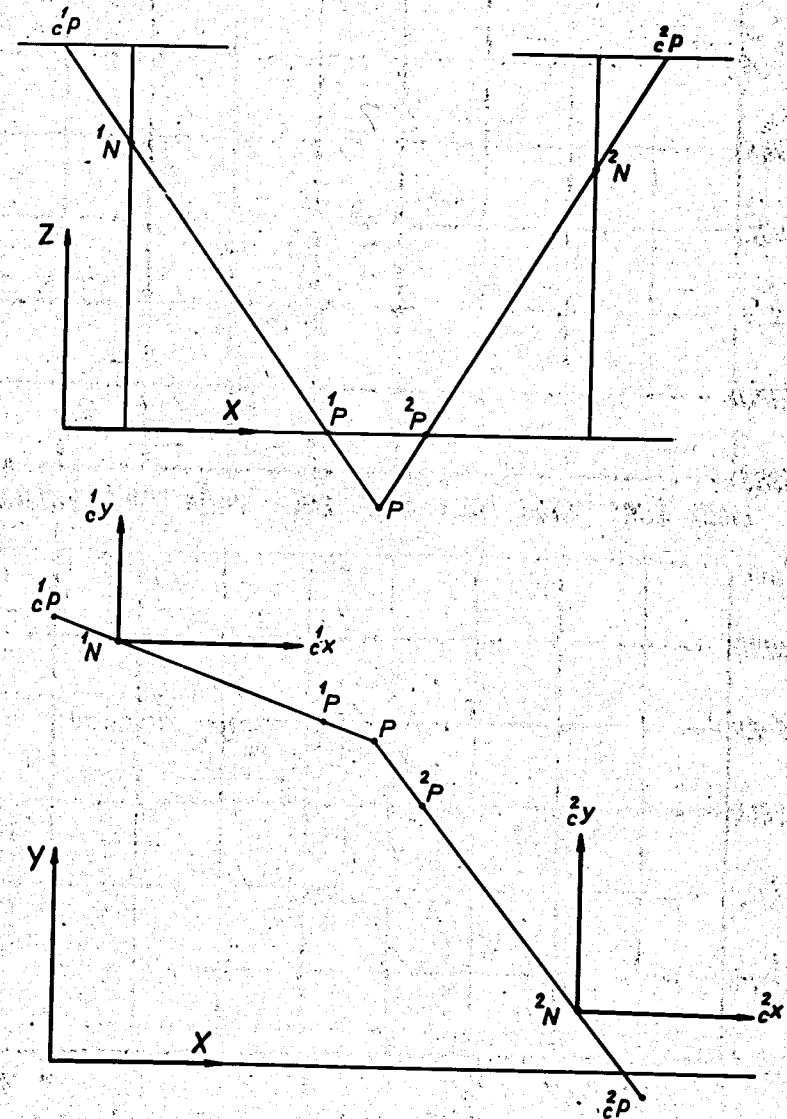


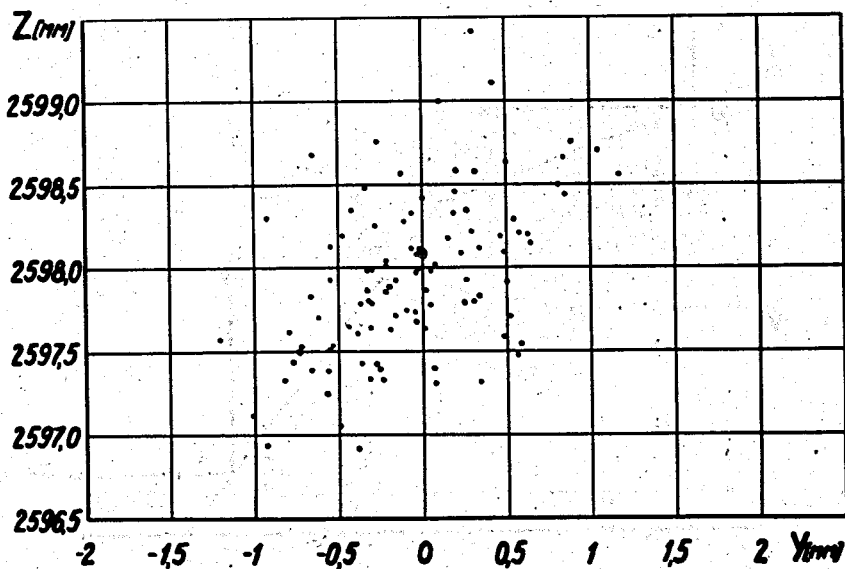
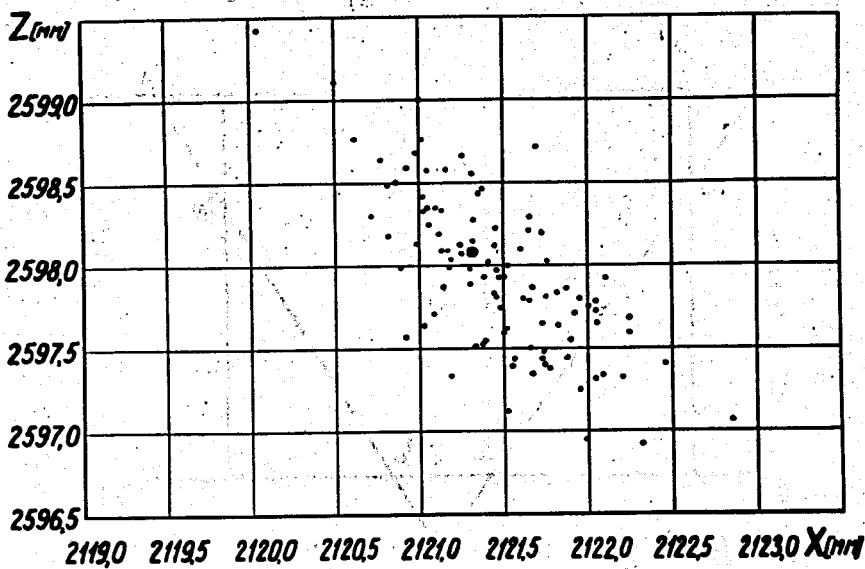
Рис. 2



Puc. 3



Puc. 4



⊙ - заданное положение узловой точки объектива

Рис. 5