

В. И. КОЗИК, Е. С. НЕЖЕВЕНКО

**КАЛИБРОВКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ДАТЧИКОВ
ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ИЗМЕРЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ
В ТРУДНОДОСТУПНЫХ МЕСТАХ**

Предложен метод калибровки телевизионных датчиков технического зрения, основанный на использовании графических эталонов, помещаемых в труднодоступном месте. Разработанный метод позволяет производить калибровку без точного позиционирования эталона как по ориентации, так и по координатам.

Ключевые слова: калибровка, графические эталоны, телевизионный датчик.

Введение. Во многих случаях необходимо измерять параметры объектов, расположенных в труднодоступных местах, при отсутствии непосредственного контакта. В такой ситуации особенно эффективны телевизионные датчики, позволяющие производить измерения,

даже если, например, объект можно видеть только через иллюминатор. Однако если при этом требуется высокая точность измерений, возникает проблема с калибровкой датчика: выдержать все параметры датчика с необходимой точностью, как правило, невозможно, правильно ориентировать калибр (эталон) в труднодоступном месте также весьма затруднительно.

В качестве примера приведем установку для роста кристаллов, где измерительный прибор — телевизионный датчик диаметра растущего кристалла [1, 2]. Наблюдение производится через иллюминатор. Датчик крепится на колпаке ростовой установки и даже небольшие перекосы крепления, а также изменения оптического пути (например, из-за толщины стекла иллюминатора) приводят к недопустимым погрешностям измерения.

Калибровка широко применяется, например, в фотограмметрии [3], однако калибровка телеизмерительных средств имеет определенную специфику. В настоящей статье предложен метод калибровки, основанный на использовании графических тестов, помещаемых в труднодоступное место (в частности, внутри ростовой установки — на месте локализации мениска растущего кристалла). Разработанный метод позволяет производить калибровку без точного позиционирования эталона как по ориентации, так и по координатам. Метод обеспечивает вычисление всех коэффициентов, входящих в алгоритм вычисления размеров по двум координатам, по его телевизионному изображению.

Схема телевизионного измерения и калибровки. Калибровка требуется, если погрешности параметров датчика выше допустимой погрешности измерения. Например, при измерении диаметра выращенного кристалла требования к отклонению измеряемого значения от заданного таковы, что возможна погрешность на уровне десятых долей процента. Погрешности параметров телевизионного датчика — фокусного расстояния объектива телевизионной камеры и геометрических параметров ее установки — существенно превышают это значение.

Определим число параметров, требуемых для калибровки телевизионных измерительных средств. В случае использования в качестве фотоприемника ПЗС-матрицы координатными искажениями на фотоприемнике можно пренебречь, поскольку геометрические параметры матрицы выдерживаются с очень высокой точностью. Настоящая работа посвящена компенсации искажений, обусловленных ракурсными преобразованиями и разбросом параметров оптической системы, а также параметрами позиционирования датчика, без учета дисторсии и других геометрических искажений. В этом случае можно считать, что плоскость P_1 (плоскость изображения) линейно преобразуется в плоскость P_2 (плоскость фотоматрицы), а их взаимное положение, как известно, определяется шестью параметрами: тремя координатами точек и тремя углами Эйлера. Следовательно, необходимо иметь шесть независимых параметров для установления взаимно однозначного соответствия между точками в плоскостях P_1 и P_2 .

Для калибровки в плоскость наблюдения P_1 помещается изображение с известными геометрическими параметрами (эталон), и из его телевизионного изображения вычисляются параметры преобразования, которые затем вводятся в алгоритм обработки.

Общая схема телевизионного измерения и калибровки представлена на рис. 1. В плоскости P_1 , в которой находится объект, при калибровке помещается эталон. Его изображение объективом L проецируется в плоскость телевизионного фотоприемника P_2 . Ось оптической системы образует угол β с нормалью к плоскости P_1 . В качестве эталона выбран прямоугольник с перекрестиями (рис. 2, а).

Толщина линий эталона выбирается из тех соображений, чтобы в плоскости фотоматрицы она соответствовала размеру элемента матрицы. Это позволяет проводить квадратичную интерполяцию по трем точкам в окрестности линий с целью повышения точности определения их координат. Поскольку ось камеры не перпендикулярна плоскости наблюдения, его телевизионное изображение представляет собой трапецию, показанную в системе координат ПЗС-матрицы на рис. 2, б.

Обозначим координаты в плоскости эталона (сцены) X, Y , а в плоскости фотоматрицы — x, y . Пусть координаты пересечения левой и правой сторон эталона с осями абсцисс будут X_2, X_1 и x_2, x_1 , а верхней и нижней с осями ординат — Y_1, Y_2 и y_2, y_1 в плоскостях сцены и фотоматрицы соответственно. В идеальном случае, когда центр эталона совпадает с центром матрицы и он сориентирован по координатным осям, к указанным параметрам достаточно вычислить угол наклона боковой грани трапеции. Тогда преобразование по координате X из плоскости фотоматрицы в плоскость сцены можно представить в виде

$$X = \frac{xX_1}{x_1 + y \operatorname{tg} \alpha},$$

а по координате Y

$$Y = \frac{yk_1}{1 - yk_2},$$

где α — угол наклона боковой грани трапеции в плоскости фотоматрицы,

$$k_1 = \frac{Y_1(1 - y_1k_2)}{y_1} = \frac{Y_2(1 - y_2k_2)}{y_2}, \quad k_2 = \frac{y_2Y_1 - y_1Y_2}{y_1y_2(Y_1 + Y_2)}.$$

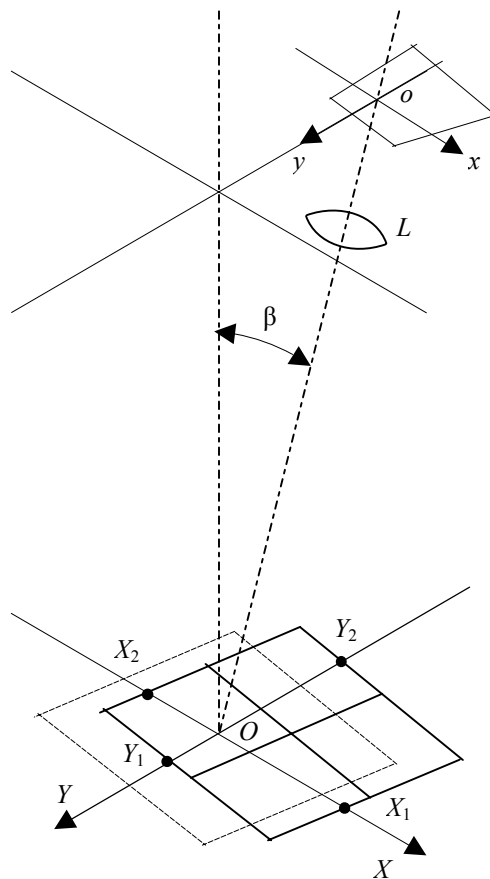


Рис. 1

Однако, учитывая, что эталон может помещаться в зоне, труднодоступной для его ориентации (например, внутри установки для роста кристаллов), алгоритм обработки должен быть таков, чтобы отклонения положения и ориентации эталона не влияли на точность калибровки. Для того чтобы не было необходимости в точном позиционировании эталона, в плоскости фотоматрицы вместо координат точек пересечения линий эталона с осями x, y , определяются координаты точек пересечения двух горизонтальных и двух вертикальных линий с линиями

эталона $(x_{l,up}, y_{up}, x_{m,up}, y_{up}, x_{r,up}, y_{up})$, $(x_{l,d}, y_d, x_{m,d}, y_d, x_{r,d}, y_d)$, $(x_{l,y_{l,m}}, x_{l,y_{l,d}}, x_{l,y_{l,m}}, x_{l,y_{l,d}})$, $(x_{r,y_{r,m}}, x_{r,y_{r,d}}, x_{r,y_{r,m}}, x_{r,y_{r,d}})$. Здесь индексы „*l*“ — левый, „*up*“ — верхний, „*m*“ — средний, „*r*“ — правый, „*d*“ — нижний (см. рис. 2, б).

По координатам точек $x_{m,up}, y_{up}, x_{m,d}, y_d, x_{l,y_{l,m}}, x_{r,y_{r,m}}$ вычисляется смещение центра эталона относительно центра матрицы (на первом этапе без учета ракурсных преобразований ввиду отсутствия калибровочных коэффициентов), по координатам пересечения вертикальных линий эталона с горизонтальными $(x_{l,y_{l,m}}, x_{l,y_{l,d}}, x_{r,y_{r,m}}, x_{r,y_{r,d}})$ определяется его наклон. Затем влияние наклона и сдвига эталона компенсируется, и вычисляются приведенные координаты y_1, y_2 и Y_1, Y_2 .

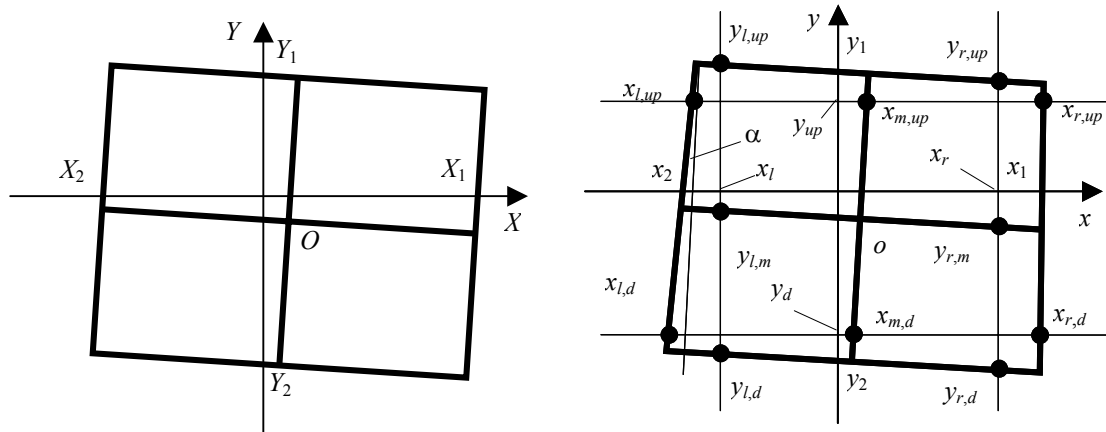


Рис. 2

Аналогичным образом по координатам пересечения горизонтальных секущих с вертикальными линиями эталона $(x_{l,up}, y_{up}, x_{m,up}, y_{up}, x_{r,up}, y_{up}, x_{l,d}, y_d, x_{m,d}, y_d, x_{r,d}, y_d)$ определяются приведенный угол наклона боковых граней трапеции в плоскости фотоматрицы α и приведенные координаты x_1, x_2 и X_1, X_2 . После этого по полученным данным вычисляются калибровочные коэффициенты k_1 и k_2 . Однако, поскольку при определении смещения центра эталона ракурсные преобразования не учитывались, далее проводится итерационная процедура по уточнению координат центра и калибровочных коэффициентов.

Программа калибровки написана на языке C++, блок-схема ее алгоритма представлена на рис. 3. При проверке „Допустимы ли значения“ сравниваются расстояния между найденными точками пересечения секущей с линиями эталона и допустимыми значениями исходя из размеров эталона и возможными масштабными преобразованиями. Если эталон развернут на слишком большой угол (в нашем случае на $\pm 10^\circ$), центральная линия эталона может пересечь секущие линии, что приведет к неверно найденным точкам, расстояние между которыми не будет удовлетворять заданным условиям. В этом случае приходит сообщение „Поверните эталон на 5° “.

Выполняется программа в том же микропроцессоре, который выполняет программу измерения. Калибровка проводится автоматически: оператор должен лишь разместить калибровочный эталон в плоскости объекта и запустить программу калибровки. По ее завершении данные калибровки передаются в алгоритм измерения. Алгоритм измерения координат точек изображения объекта в настоящей статье не описывается, поскольку он существенно зависит от характера объекта измерения. Перечислим некоторые его особенности, часто встречающиеся на практике.

1. В случае, если размер элемента ПЗС-матрицы больше допустимой погрешности измерения, необходимо вводить в алгоритм субпиксельность, например, посредством интерполяции сигнала.

2. Часто по той или иной причине изображения краев объекта измерения оказываются малококонтрастными. В этом случае необходима цифровая обработка изображения объекта (оконтуривание, выравнивание контраста и т. д.).

3. Если в поле наблюдения присутствуют другие объекты (например, датчик диаметра растущего кристалла „видит“ и ростовые кольца, похожие на измеряемый объект — мениск), перед измерением требуется предварительно проводить процедуру распознавания.

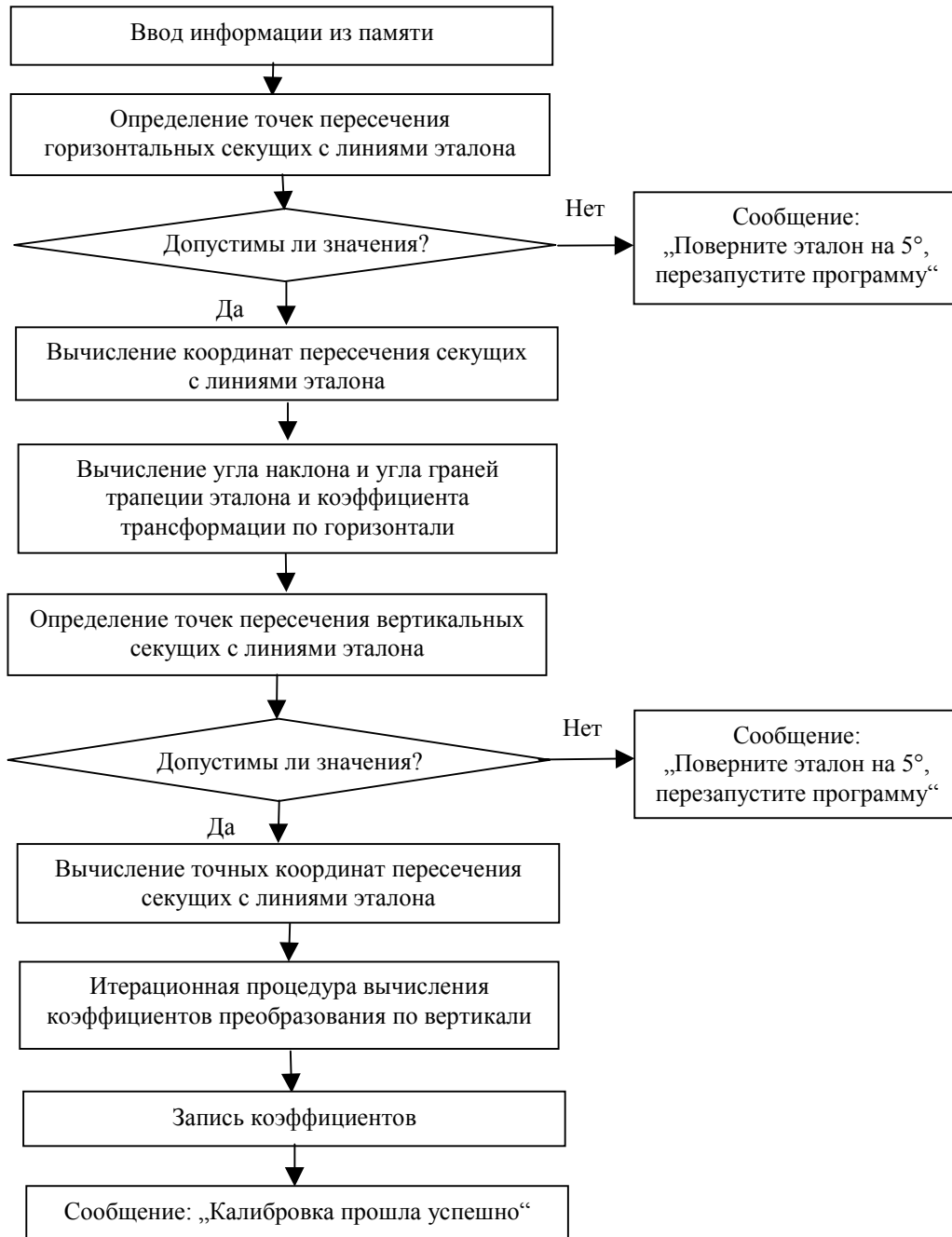


Рис. 3

Экспериментальные результаты. Эффективность предложенного метода калибровки оценивалась путем метрологического исследования откалиброванного по предложенному методу датчика в режиме измерения диаметра тестовых объектов, представляющих собой кольцо (при малом диаметре — круги), начерченные на лавсановой подложке. Диаметр тестовых объектов от 5 до 200 мм. Изображения „рисовались“ на двухкоординатном плоттере, после чего их диаметр измерялся на инструментальном микроскопе. Использовалась фотоматрица размерностью 576×640 элементов. Размер элемента, приведенный к объектной плоскости, составлял 0,12×0,18 мм для объектов диаметром до 25 мм и 0,4×0,6 мм — для объектов диаметром более 25 мм (применялись объективы с разными фокусными расстояниями).

Тестовые объекты помещались в плоскость объекта измерения, в процессе эксперимента их центры смещались на допустимое значение сдвига объекта в плоскости P_1 . Результаты метрологических испытаний представлены в таблице.

Диаметр объекта, мм	Измеренный диаметр, мм			Максимальное отклонение, мм
	без смещения	смещение по оси X	смещение по оси Y	
5,12	5,10—5,14	5,09—5,13	5,08—5,14	-0,04—+0,02
10,12	10,09—10,15	10,08—10,15	10,08—10,16	-0,04—+0,04
20,13	20,11—20,17	20,08—20,15	20,08—20,17	-0,05—+0,04
49,71	49,66—49,76	49,61—49,77	49,65—49,76	-0,10—+0,06
99,90	99,87—99,92	99,87—100,01	99,92—100,02	-0,03—+0,12
149,37	149,33—149,41	149,35—149,47	149,30—149,40	-0,07—+0,10
198,70	198,57—198,61	198,58—198,77	198,67—198,85	-0,13—+0,15

В первом столбце приведены значения диаметра тестовых объектов, измеренные с помощью микроскопа, далее представлены показания датчика при смещении центра теста ± 20 мм по двум координатам в поле наблюдения. Из таблицы видно, что максимальная погрешность не превышает $\pm 0,05$ мм для объектов диаметром до 25 мм и $\pm 0,15$ мм — для объектов диаметром более 25 мм.

Заключение. Разработан метод калибровки телевизионных датчиков технического зрения, основанный на обработке эталонного изображения, с помощью которого можно компенсировать ракурсные преобразования, а также погрешности фокусного расстояния объектива и расстояния до измеряемого объекта. При этом нет необходимости точно позиционировать эталон. Экспериментальные результаты, полученные на стенде, показали, что предложенный метод калибровки обеспечивает высокую точность последующего измерения (причем за счет введения субпиксельности погрешность измерения меньше размера элемента используемой ПЗС-матрицы), а апробация его на установке для роста кристаллов показала, что он действительно весьма эффективен в случае, если эталон располагается в труднодоступном месте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozik V. I., Nezhevenko E. S. Monitoring of monocrystal diameter in growing vessel // Proc. IASTED Int. Conf. on Automation, Control and Information Technology — ACIT'2005. Novosibirsk, 2005. P. 59—62.
2. Kozik V. I., Nezhevenko E. S. Measuring silicon monocrystal diameters during melt growth // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2008. Vol. 44, N 5. P. 392—402.
3. Manual of Photogrammetry / Ed. by M. M. Thomson. Speert American Society of Photogrammetry, 1970.

Сведения об авторах

Виктор Иванович Козик

— канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, лаборатория физико-технических проблем дистанционной диагностики, Новосибирск; E-mail: kozik@iae.nsk.su

Евгений Семенович Нежевенко

— д-р техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, лаборатория физико-технических проблем дистанционной диагностики, Новосибирск; E-mail: nejevenko@iae.nsk.su

Поступила в редакцию
12.01.09 г.