

ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ КООРДИНАТОМЕР

А.А. Мирме, Х.Ф. Таммет, М.М. Фишер, М.У. Арольд, Э.И.Тамм

В статье [1] описана полуавтоматическая проекционно-измерительная установка, предназначенная для измерения, кодирования и регистрации на перфоленту координат точек изображений, зафиксированных на фотопленке, с целью последующей обработки на ЭВМ. Эта установка полностью оправдала себя на практике при обработке треков аэрозольных частиц, полученных при помощи траекторного спектрометра [2], а также при кинематическом анализе движения спортсменов (при обработке спортивных кинограмм) [3]. Однако ряд принципиальных и технических недостатков усложняет работу с прибором и препятствует более широкому его внедрению. Во-первых, механическое устройство передачи (МП) движения шупа валом потенциометров ненадежно: тросы часто соскакивают с блоков, а прохождение тросов через малые отверстия (узлы системы координат) приводит к их быстрому изнашиванию. Во-вторых, процедура калибровки установки учитывает точки лишь на двух диагональных прямых; таким образом, аберрации оптических систем учитываются не полностью. Это требует применения хорошей длиннофокусной проекционной (и, разумеется, съемочной) оптики и, соответственно, увеличения габаритов установки. После каждого отказа МП всю калибровку необходимо производить заново. В-третьих, многоступенчатый путь получения кодированной информации о значении координаты (длина троса - угол поворота вала потенциометра - напряжение на выходе потенциометра - результат измерения напряжения - код) снижает надежность установки.

В описываемой ниже новой модификации полуавтоматического координатомера применяется система криволинейных координат без узловых точек, что резко повышает надежность МП. Применение кодовых дисков существенно укорачивает путь получения кодированных значений координат (длина троса - угол поворо-

та диска - код), самокорректирующий код еще более повышает надежность установки. Новая калибровочная процедура лучше учитывает аберрации оптических систем, допуская применение короткофокусных съемочных и проекционных объективов. Исходная информация, зафиксированная на фото- или кинолентке с размерами кадра $24 \times 36 \text{ мм}^2$, $16 \times 22 \text{ мм}^2$ или $7,5 \times 10 \text{ мм}^2$ проектируется на экран размерами $270 \times 370 \text{ мм}^2$ с помощью сменных объективов. При этом расстояние от объектива до экрана из матового стекла меняется мало, не превышая 600 мм. На установке можно также обрабатывать записи самописцев, графики, чертежи и другую записанную на бумагу информацию.

Экран и измерительная система нового координатомера схематически изображены на рис. 1. Положение точек на экране целесообразно описывать в прямоугольной системе координат с началом в центре экрана O . Оси Ox , Oy этой системы координат нанесены на экран. Прямое определение координат x , y точек экрана затруднительно. В установке используется промежуточная криволинейная координатная система, наиболее просто и надежно реализуется механически. Основными деталями этой реализации являются два шкива с намотанными и закрепленными на них одними концами тросиками; другие концы тросиков закреплены у щупа, острый кончик которого человек-оператор совмещает с исследуемой точкой $P(x, y)$ на рис. 1). Прикрепленные к валам шкивов спиральные пружины натягивают тросики. На общих валах со шкивами закреплены кодовые диски - стеклянные диски с нанесенной на них маской кода Грея (отраженного двоичного кода). Оси вращения шкивов и дисков обозначены буквами A и B на рис. 1.

Любому положению кончика щупа на экране в точке $P(x, y)$ однозначно соответствует пара значений длин "отмотанных" частей тросиков l_1 , l_2 (т.е. длин тросиков от неподвижных относительно экрана точек M и N до щупа в точке P) или пара значений однозначно связанных с длинами l_1 и l_2 углов поворота дисков φ_1 , φ_2 с некоторого начального положения. Коды, соответствующие углам поворота φ_1 и φ_2 , считываются с кодовых дисков фотоэлектрически, преобразуются электрической схемой в позиционный двоичный код и записываются на перфоленту. На рис. 2 показана форма записи координат на

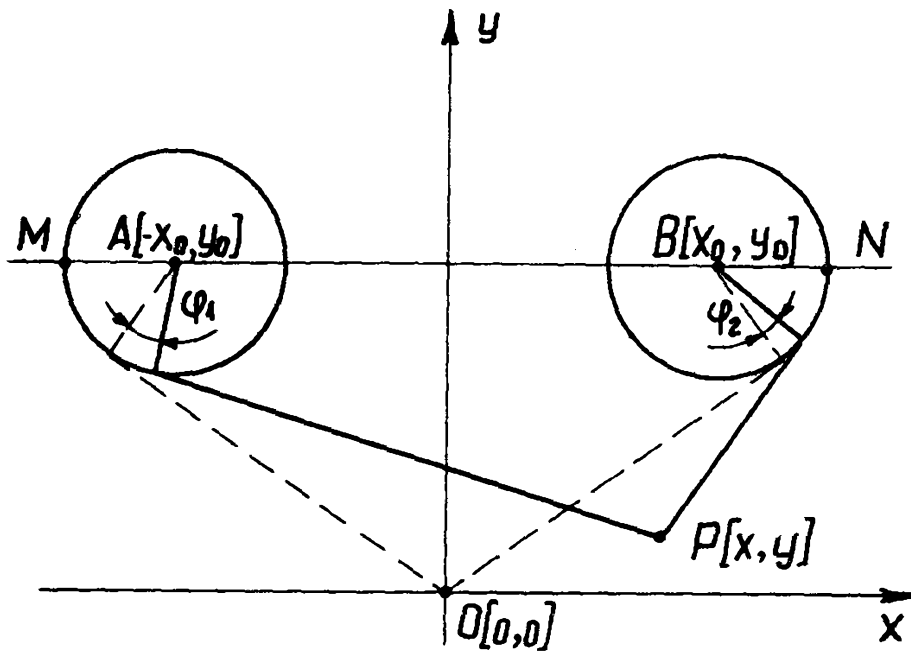


Рис. 1. Схема измерительного устройства координатомера.

дорожка строка	5	4	Г	3	2	1	
	начало						
1	K^1	2^9	○	2^8	2^7	2^6	Левая коорди- ната p
2	K^2	2^5	○	2^4	2^3	2^2	
3	K^3	2^1	○	2^0	2^9	2^8	
4	K^4	2^7	○	2^6	2^5	2^4	Правая коорди- ната q
5	K^5	2^3	○	2^2	2^1	2^0	
6	K^6	K_4	○	K_3	K_2	K_1	
	конец						

Рис. 2. Форма записи координат одной точки на перфоленту.

перфоленту. Квадратик с числом 2^i обозначает место записи значения i -того разряда позиционного двоичного кода. Приняты специальные меры для исключения возможных ошибок при перфорировании и считывании информации с перфоленты. Пятую дорожку и шестую строку занимают сигналы, вырабатываемые схемой корреляции таким образом, чтобы количество единиц в каждой строке и по каждой дорожке было всегда четным числом. В случае одиночной ошибки ЭВМ путем проверки правила четности обнаруживает и исправляет ее; если же ошибок больше, то ЭВМ лишь обнаруживает их. Имеется и система, непосредственно сообщающая о неполадках в перфораторе. Правильность считывания кода с кодовых дисков автоматически не проверяется.

Вычисление декартовых координат через криволинейные осуществляется ЭВМ. Вывод точных формул, выражающих декартовы координаты через криволинейные, неосуществим, поэтому применяются аппроксимирующие полиномы. Для упрощения вида полиномов приняты следующие конструктивные и математические приемы: 1) оси вращения шкивов расположены с высокой степенью точности симметрично относительно оси y ; 2) криволинейными координатами выбраны величины $u = \rho + q$, $v = \rho - q$, где ρ есть разность длин l_1 для исследуемой точки и точки O , q — то же для l_2 . Система координат u, v оказывается приблизительно ортогональной в пределах экрана, сетка координатных линий симметрична относительно оси y , а нулевые линии проходят через центр экрана. Математическим экспериментом установлено, что теперь достаточную для практики точность гарантируют такие аппроксимирующие полиномы:

$$x = C_1 v + C_2 v^2 + C_3 uv + C_4 u v^2 + C_5 u^2 v \quad (1)$$

$$y = C_1' u + C_2' u^2 + C_3' u^3 + C_4' u^4 + C_5' u^5 + C_6' v^2 + C_7' v^2 u + \\ + C_8' v^2 u^2 + C_9' v^2 u^3 + C_{10}' v^4. \quad (2)$$

Коэффициенты $C_1, \dots, C_5, C_1', \dots, C_{10}'$ определяются при калибровке установки. Для этого измеряются координаты u, v точек специальной калибровочной сетки (94 точки), координаты x, y которых заранее известны; составляются две системы из 94 уравнений типа (1) и (2), и решаются эти системы относи-

тельно неизвестных коэффициентов методом наименьших квадратов. Такой способ определения коэффициентов устраняет ошибки, связанные с неточностью изготовления и сборки установки и почти полностью исключает геометрические искажения (аберрации) объективов как проектора, так и съемочной камеры. Действительно, при съемке и проектировании на экран калиброванной сетки и измеряемого объекта одними и теми же объектами искажения изображений обоих будут одинаковы. Калибруя установку по этому изображению, ЭВМ подбирает коэффициенты не по действительным декартовым координатам на экране, а по координатам, сетки перед съемочной камерой. Образно говоря, ЭВМ как бы накладывает неискаженную декартовую систему координат, но не на плоскость экрана, а на плоскость калибрационной сетки. Если сетка заменяется на измеряемый объект, то, естественно, координаты последнего будут "правильными" несмотря на то, что изображение на экране явно искажено.

Интересно отметить, что также могут компенсироваться погрешности, связанные с индивидуальными особенностями работы оператора, т.к. с точки зрения установки они аналогичны искажениям оптики.

Весь процесс преобразования и измерения координат схематически изображен на рис. 3.

Принципиальная электрическая схема установки приведена в отчете [4]. Она выполнена на дискретных компонентах и повторять ее в настоящее время нецелесообразно. Современная интегральная логика позволяет выполнить те же функции гораздо проще и надежнее.

Предельная ошибка измерения координат складывается из приборной и процедурной ошибок. Приборная ошибка определяется, главным образом, дискретностью кодирования и при использовании десяти разрядов кода Грея не превышает 0,5 мм на плоскости экрана. Имеется возможность уменьшения этой ошибки в 4 раза. Процедурная ошибка определяется, в основном, качеством работы оператора и зависит от темпа работы. Нормальным темпом работы на старой установке (описанной в [1]) считалось 1 точка в секунду. В новой установке коды обоих координат считываются одновременно и запоминаются, здесь можно

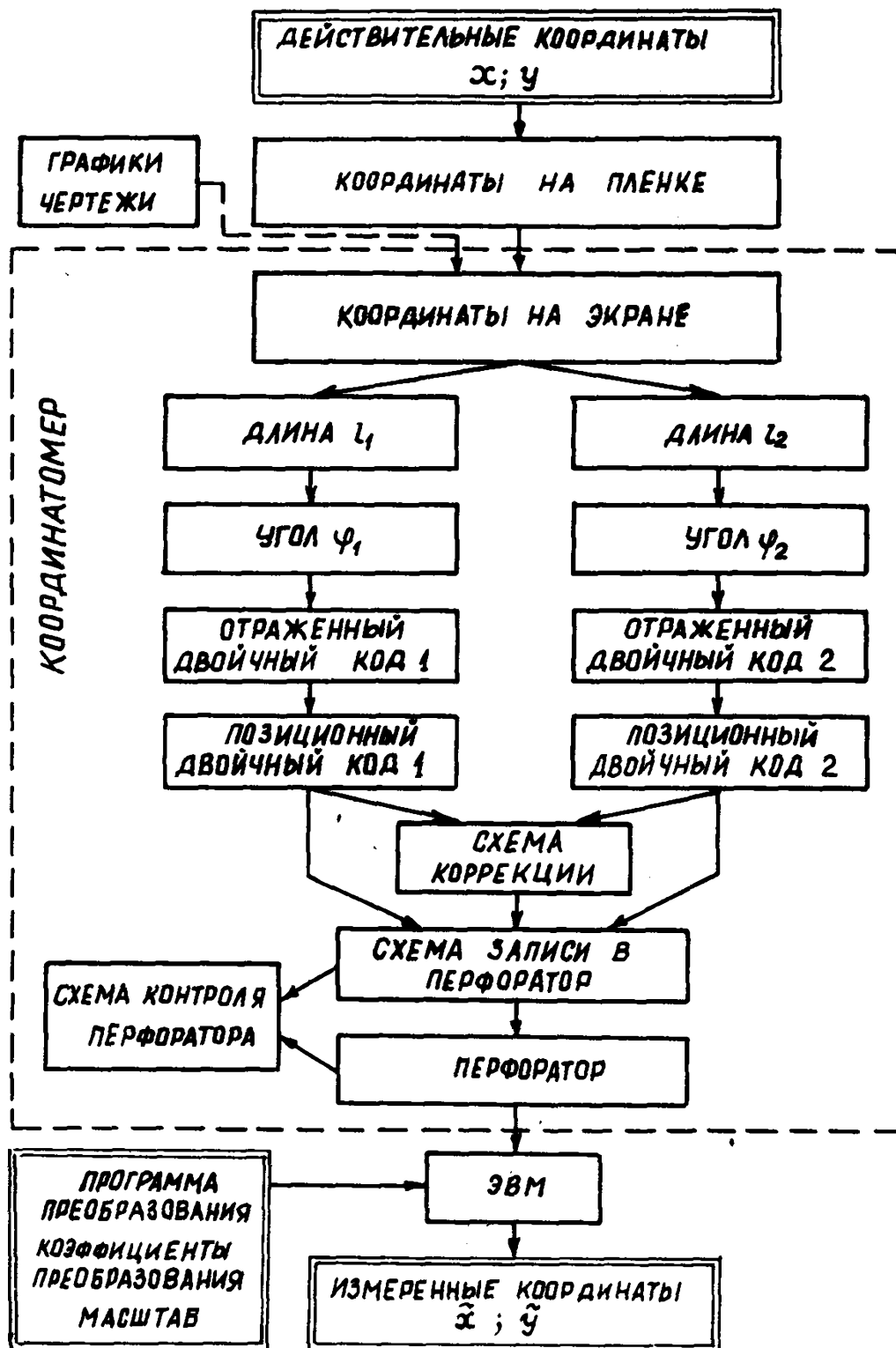


Рис. 3. Блок-схема цикла преобразования и измерения координат

сразу после подачи команды на запись (нажатия на щуп) переместить щуп к следующей точке, не дожидаясь конца записи. Это позволяет повысить темп работы - нормальным можно считать 1-2 точки в секунду (максимально 3 точки). При нормальном темпе работы процедурная ошибка несколько превышает приведенную выше приборную ошибку. Повышенную точность кодирования следует применять только в специальных случаях, когда требуется особая точность. Тогда щуп надо заменить на какое-то устройство, позволяющее точнее совместить точку пересечения направлений тросиков с исследуемой точкой на экране.

Установка достаточно малогабаритна (габаритные размеры 740x850x1160 мм³) и удобна в работе. Ее принципиальный недостаток - обязательное участие человека - часто оборачивается и пользой, поскольку не требуется постоянной связи с ЭВМ и значительно сокращается объем перерабатываемой ею информации.

Л и т е р а т у р а

1. Фишер М.М., Таммет Х.Ф., Тамм Э.И. Полуавтоматическая проекционно-измерительная установка. - Учен. зап. Тарт. ун-та, 1973, вып. 320, с. 129-136.
2. Тамм Э.И. Экспериментальное исследование генератора монобильного аэрозоля. - Учен. зап. Тарт. ун-та, 1973, вып. 320, с. 163-173.
3. Вайн А.А., Фишер М.М., Зинковский А.В. Исследования точности киноциклографического метода. - Учен. зап. Тарт. ун-та, вып. 410, с. 58-69.
4. Разработка автоматического регистратора-перфоратора кинематических показателей и составление программ обработки данных. - Заключит. отчет договора № А-2131 ТГУ и ТПедИ. Рукопись, № гос. рег. 71043511.

A SEMIAUTOMATIC DIGITIZER OF CO-ORDINATES

A. Mirme, H. Tammet, M. Fischer, M. Arold and E. Tamm

Summary

The paper describes an improved version of a semiautomatic digitizer of co-ordinates, which tries to avoid the drawbacks of the device discussed in paper [1] .

Changes in the mechanism of the measuring system, in the manner of coding the results and in the method of calibration have made it possible to increase the reliability, accuracy and speed of operation of the device.