

DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86

УДК 681.723.078, 681.775.078, 681.777.078

Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах

Асп. Н. О. Старосотников¹⁾, канд. техн. наук, доц. Р. В. Фёдорцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В метрологических оптико-электронных системах, таких как автоколлиматоры, звездные датчики, датчики Шака–Гартмана, в схемах геометрической калибровки цифровых фотокамер для аэро- и космической съемки, в различных системах следающего типа, основанных на определении координат изображений простых форм, одним из важных и существенных параметров является точность определения этих координат. В статье приводится описание математической модели измерительного стенда на базе коллиматора, проецирующего тест-объект на фотоприемник оптико-электронного прибора. Математическая модель учитывает характерные шумы для фотоприемников: дробовый полезного сигнала (фотонный) и дробовый темнового сигнала, считывания и пространственную неоднородность элементов ПЗС-матрицы. С целью снижения влияния шумов предлагается применять фильтр Винера для сглаживания изображения и однозначной его идентификации, а также вводить порог по уровню яркости. Приводится сравнение двух алгоритмов определения координат по энергетическому центру тяжести и по контуру. При определении контура тест-объекта использовались детекторы Собела, Прюитта, Робертса, лапласиана гауссиана, Канни. Сущность алгоритма определения координат заключается в поиске контура изображения в виде окружности с последующей его аппроксимацией и определением центра изображения. Произведен расчет погрешности определения координат центра тяжести для тест-объектов различных диаметров (5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс) фотоприемника, а также значений отношения сигнал/шум 200, 100, 70, 20, 10. Отношение сигнал/шум рассчитывалось как разница максимальной интенсивности изображения тест-объекта и фона, деленная на среднеквадратическое отклонение фона. С увеличением отношения сигнал/шум улучшается точность определения координат на 0,5–1 порядок. Улучшение точности с увеличением диаметра тест-объекта характерно для больших отношений сигнал/шум: 70 и более. На основании проведенных исследований установлено, что алгоритм определения координат по энергетическому центру тяжести является более точным по сравнению контурными методами и требует меньших вычислительных мощностей (для программного пакета MatLab), что связано с дискретностью при определении контура.

Ключевые слова: аппроксимация окружностью, коллиматор, определение контуров изображений, оптико-электронный прибор, фотоприемник, центр тяжести

Для цитирования: Старосотников, Н. О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 1. С. 79–86. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79-86

Accuracy Comparison of Algorithms for Determination of Image Center Coordinates in Optoelectronic Devices

М. А. Starasotnikau¹⁾, R. V. Feodortsau¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Accuracy in determination of coordinates for image having simple shapes is considered as one of important and significant parameters in metrological optoelectronic systems such as autocollimators, stellar sensors, Shack-Hartmann

Адрес для переписки

Фёдорцев Ростислав Валерьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-62-86
lft@bntu.by

Address for correspondence

Feodortsau Rostislav V.
Belarusian National Technical University
22 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel: +375 17 292-62-86
lft@bntu.by

sensors, schemes for geometric calibration of digital cameras for aerial and space imagery, various tracking systems. The paper describes a mathematical model for a measuring stand based on a collimator which projects a test-object onto a photodetector of an optoelectronic device. The mathematical model takes into account characteristic noises for photodetectors: a shot noise of the desired signal (photon) and a shot noise of a dark signal, readout and spatial heterogeneity of CCD (charge-coupled device) matrix elements. In order to reduce noise effect it is proposed to apply the Wiener filter for smoothing an image and its unambiguous identification and also enter a threshold according to brightness level. The paper contains a comparison of two algorithms for determination of coordinates in accordance with energy gravity center and contour. Sobel, Pruitt, Roberts, Laplacian Gaussian, Canny detectors have been used for determination of the test-object contour. The essence of the algorithm for determination of coordinates lies in search for an image contour in the form of a circle with its subsequent approximation and determination of the image center. An error calculation has been made while determining coordinates of a gravity center for test-objects of various diameters: 5, 10, 20, 30, 40, 50 pixels of a photodetector and also signal-to-noise ratio values: 200, 100, 70, 20, 10. Signal-to-noise ratio has been calculated as a difference between maximum image intensity of the test-object and the background which is divided by mean-square deviation of the background. The accuracy for determination of coordinates has been improved by 0.5-1 order in case when there was an increase in a signal-to-noise ratio. Accuracy improvement due to increase of a diameter in a test-object is typical for large signal-to-noise ratios: 70 or more. The conducted investigations have made it possible to establish that the algorithm for determination of coordinates of the energy gravity center is more accurate in comparison with contour methods and requires less computing power (for the MatLab software package), which is related to discreteness while determining a contour.

Keywords: circle approximation, collimator, determination of image contours, optoelectronic device, photodetector, centre of gravity

For citation: Starasotnikau M. A., Feodortsau R. V. (2018) Accuracy Comparison of Algorithms for Determination of Image Center Coordinates in Optoelectronic Devices. *Science and Technique*. 17 (1), 79–86. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-1-79–86 (in Russian)

Введение

В основе математической обработки данных автоколлиматоров [1], звездных датчиков [2], датчиков Шака–Гартмана [3], схем геометрической калибровки оптико-электронных приборов [4], различных следящих систем лежит определение координат изображения, спроецированного на фотоприемник оптико-электронного прибора. Для повышения точности измерений необходимо исследовать влияние различных параметров на точность определения координат изображения. В [5] исследованы алгоритм определения координат изображения по центру тяжести и способы повышения его точности. В [6] для калибровки цифровой камеры предложено предварительно определять контур проецируемого массива точек, а в последующем – их центры.

В данной работе исследуется точность алгоритма определения координат, заключающегося в определении контура изображения в виде окружности, аппроксимации данного контура и нахождении его центра, который в свою очередь совпадает с центром изображения. Определение контура выполнялось при помощи детекторов Собела, Прюитт, Робертса, лапласиана гауссиана, Канни. Данные детекторы наиболее часто используются в задачах цифровой обработки изображений для обнаружения границ по разрыву яркости [7].

В программном пакете MatLab математически смоделирована оптическая схема, состоящая из проецирующего тест-объект коллиматора на матричный фотоприемник оптико-электронного прибора. Коллиматор состоит из объектива и установленного в фокальной плоскости тест-объекта, который подсвечивается осветителем. Оптико-электронный прибор состоит из объектива и фотоприемника. Преднамеренное смещение тест-объекта коллиматора на доли пикселя фотоприемника приводит к ошибке определения соответствующего смещения на фотоприемнике, в первую очередь из-за дискретной структуры фотоприемника, а также шумов.

Описание математической модели

В основе исследований заложена математическая модель часто встречающейся схемы контроля, которая описана в [5]. Объектив коллиматора проецирует тест-объект в виде круга на фотоприемник оптико-электронного прибора. Для упрощения объективы коллиматора и оптико-электронного прибора идентичны, с фокусным расстоянием 1000 мм. Длина волны подсветки тест-объекта коллиматора 0,6 мкм. Расчет производился для тест-объектов диаметрами 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс фотоприемника. Размер пикселя фотоприемника 4,5 мкм. Шаг дискретизации в модели – 5 (0,9 мкм). Таким образом, на один пиксель фотоприемника

приходится 5×5 элементов модели. Поскольку основная цель исследования состоит в оценке точности и сравнении по точности алгоритмов определения координат центров изображений, не учитывались температурный дрейф пикселей фотоприемника, абберации и коэффициент пропускания оптических компонентов.

Смоделированный тест-объект проецируется объективом коллиматора в оптико-электронный прибор, объектив которого формирует изображение на фотоприемнике. В модели данные явления математически описаны операцией свертки функции, задающей рисунок тест-объекта, и функцией рассеяния точки объектива с наименьшим диаметром функции рассеяния точки. В данном случае, как сказано выше, объективы коллиматора и оптико-электронного прибора одинаковые, поэтому их функции рассеяния точки одинаковые.

В модели учитывались следующие шумы, характерные для современных промышленных цифровых камер: дробовый полезного сигнала (фотонный) и дробовый темнового сигнала, считывания и пространственная неоднородность элементов фотоприемника. Дробовый шум описывается распределением Пуассона, шум считывания – распределением Гаусса со среднеквадратическим отклонением (СКО) 15 электрон, темновой сигнал – 15 электрон. Пространственная неоднородность – 1 %. Также учитывалось квантование фотоприемником изображения тест-объекта. Шаг квантования – 10 бит.

Для снижения влияния шумов применялся фильтр Винера размером 5×5 пикс, а также вводился порог [8], значения яркости ниже которого принимались равными нулю. Величина порога была в 10 раз больше среднего значения фоновой яркости. Размер фильтра и величина порога определялись для достижения достоверного вычисления контуров, т. е. при данных значениях определяется только один замкнутый контур изображения тест-объекта. Помимо этого, такие меры повышают точность расчета центра тест-объекта по центру тяжести.

Выполнялось смещение изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника. Из-за дискретности фотоприемника и шумов расчет смещения не соответствовал заданному смещению. Данная погрешность определяет точность, которая будет ос-

новным критерием сравнения алгоритмов определения центра изображения. Погрешность является периодической и систематической [5]. Максимум погрешности приходится на 0,25 и 0,75 пикс смещения изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника, минимум – на 0,5 и 1,0 пикс. Однако погрешность также носит случайный характер, поскольку неизвестно первоначальное расположение изображения тест-объекта относительно матричной структуры фотоприемника, и кроме как при математическом моделировании, невозможно предварительно ее исключить. Поэтому стоит задача в ее исследовании, поиске оптимального размера диаметра тест-объекта, других способов математической обработки для уменьшения погрешности.

Описание алгоритмов определения центра изображений

Алгоритм определения координат по центру тяжести осуществляется по следующей формуле

$$x_0, y_0 = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} n, m}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}, \quad (1)$$

где $I_{n,m}$ – величина яркости в пикселе n, m ; n, m – порядковые номера пикселей по столбцам и строкам матрицы яркостей; N, M – общее число столбцов и строк матрицы яркостей.

С помощью (1) производится непосредственно оценка координат изображения тест-объекта, а также осуществляется интерполяция результатов измерений дискретной матричной структурой на внутренние точки интервалов дискретизации [5].

Алгоритм определения координат по контуру заключается в определении контура изображения и аппроксимации полученного контура геометрической фигурой с известными параметрами (центр, радиус), одни из которых будут центром изображения. В данной работе изображение на фотоприемнике в двумерном представлении является кругом, тогда его контуром будет окружность, а центр окружности –

центром изображения на фотоприемнике. Определение контура заключается в обработке изображения с фотоприемника скользящим детектором, что осуществляется путем свертки. От детектора будут зависеть форма и достоверность контура. Детекторы Собела, Прюитт, Робертса используют следующие фильтры для численного приближения производных [9] по соответствующим направлениям:

• Собела:

$$G_x, G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

• Прюитт:

$$G_x, G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

• Робертса:

$$G_x, G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Лапласиан гауссиана обнаруживает края, выполняя поиск пересечений нулевого уровня после фильтрации гауссианом. При использовании детектора Канни [10] изображение первоначально сглаживается гауссовым фильтром для уменьшения шума. В каждой точке вычисляются градиент и направление края. Точки перепада определяются как точки локального максимума градиента. Алгоритм отслеживает этот максимум и присваивает точкам вне максимума нулевые значения. Результатом является контур. Данный контур подвергается двухпороговой обработке, в результате добавляются дополнительные точки для формирования плавного контура. Результатом обработки изображения тест-объекта (рис. 1а) будут логические массивы данных, которые представлены на рис. 1б–1ф.

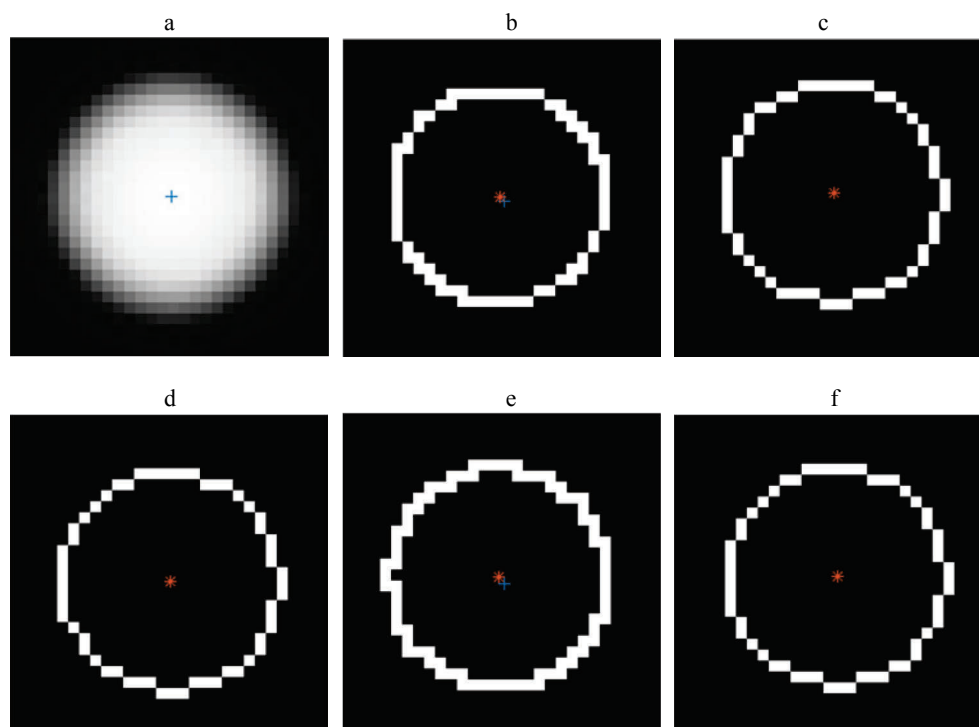


Рис. 1. Представление изображения тест-объекта с указанием центра:
а – изображение тест-объекта на фотоприемнике; б, с, д, е, ф – результат обработки детекторами Канни, лапласиана гауссиана, Прюитта, Робертса и Собела соответственно

Fig. 1. Representation of test-object image with center indication:
а – test-object image on photodetector; б, с, д, е, ф – processing results while using Canny, Laplasian Gaussian, Pruitt, Roberts and Sobel detectors, respectively

Описание алгоритма аппроксимации окружностью

Массивы контуров, полученные при помощи применения разных детекторов, аппроксимировались окружностью, чтобы затем определить ее центр. Аппроксимация является минимизацией следующей суммы квадратов путем дифференцирования J по x_0 , y_0 и R [9], где суммирование ведется по всем контурным элементам:

$$J = \sum_{i=1}^N w_i \left((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - R^2 \right)^2,$$

где x_i , y_i – контурные элементы; w_i – вес контурного элемента, $i = 1 \dots n$.

Тогда x_0 , y_0 и R задаются формулами:

$$x_0 = \frac{ByCx - BxCy}{AxBy - AyBx}; \quad y_0 = \frac{AyCx - AxCy}{AyBx - AxBy};$$

$$R^2 = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i \left((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 \right)^2;$$

где

$$W = \sum_{i=1}^N w_i; \quad \bar{x} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i x_i; \quad \bar{y} = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N w_i y_i;$$

$$Ax = \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \bar{x}) x_i; \quad Bx = \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \bar{x}) y_i;$$

$$Cx = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (x_i - \bar{x}) (x_i^2 + y_i^2);$$

$$Ay = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \bar{y}) x_i; \quad By = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \bar{y}) y_i;$$

$$Cy = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \bar{y}) (x_i^2 + y_i^2).$$

Влияние на точность аппроксимации различных факторов, вызывающих отклонение от окружности, может быть уменьшено путем присвоения элементам контура весов w_i . В первоначальной итерации веса всех элементов контура будут равны 1. Затем все контурные точки повторно оцениваются в зависимости от их отклонения от аппроксимированной окруж-

ности, и вычисление x_0 , y_0 и R повторяется. Наиболее естественным выбором для весов является обратное квадрату расстояние от отдельных элементов контура x_i , y_i к ранее определенной окружности, т. е. $w_i = 1/d_i^2$,

где $d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - R$ – невязки.

Помимо этого, исключаются элементы массива, которые явно не относятся к истинной окружности. Веса определяются

$$w_i = \begin{cases} 1 - d_i / (2\sigma) & \text{для } |d_i| < 2\sigma; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где σ^2 – СКО

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N d_i^2 / (n - 1).$$

Процедура определения весов и пересчета параметров аппроксимирующей окружности выполняется итерационно. Критерием остановки итераций является прекращение уменьшения σ^2 . Обычно необходимо выполнить три итерации.

Центр окружности и будет являться центром изображения тест-объекта на фотоприемнике.

Сравнение двух алгоритмов

Численные исследования проводились на разработанной математической модели. Произведен расчет погрешности определения координат центра тяжести различными алгоритмами – энергетическим и контурными – для тест-объектов диаметров 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс фотоприемника, а также значений отношения сигнал/шум 200, 100, 70, 20, 10. Отношение сигнал/шум рассчитывалось как разница максимальной интенсивности изображения тест-объекта и фона, деленная на СКО фона. Расчет производился в MatLab для выборки, состоящей из 100 изображений, для каждого диаметра тест-объекта. Изображения отличались друг от друга из-за случайного характера шумов фотоприемника. По каждому изображению определялся центр тяжести. Задавалось смещение тест-объекта на 0,25 пикс и вычислялась погрешность как разница между заданным и фактическим смещениями тест-объекта отно-

сительно матричной структуры фотоприемника. Затем значения погрешности усреднялись по всей выборке с учетом весов. Полученные средневзвешенные результаты зависимости по-

грешности определения центра изображения тест-объекта на фотоприемнике от диаметра тест-объекта для различных алгоритмов представлены на рис. 2.

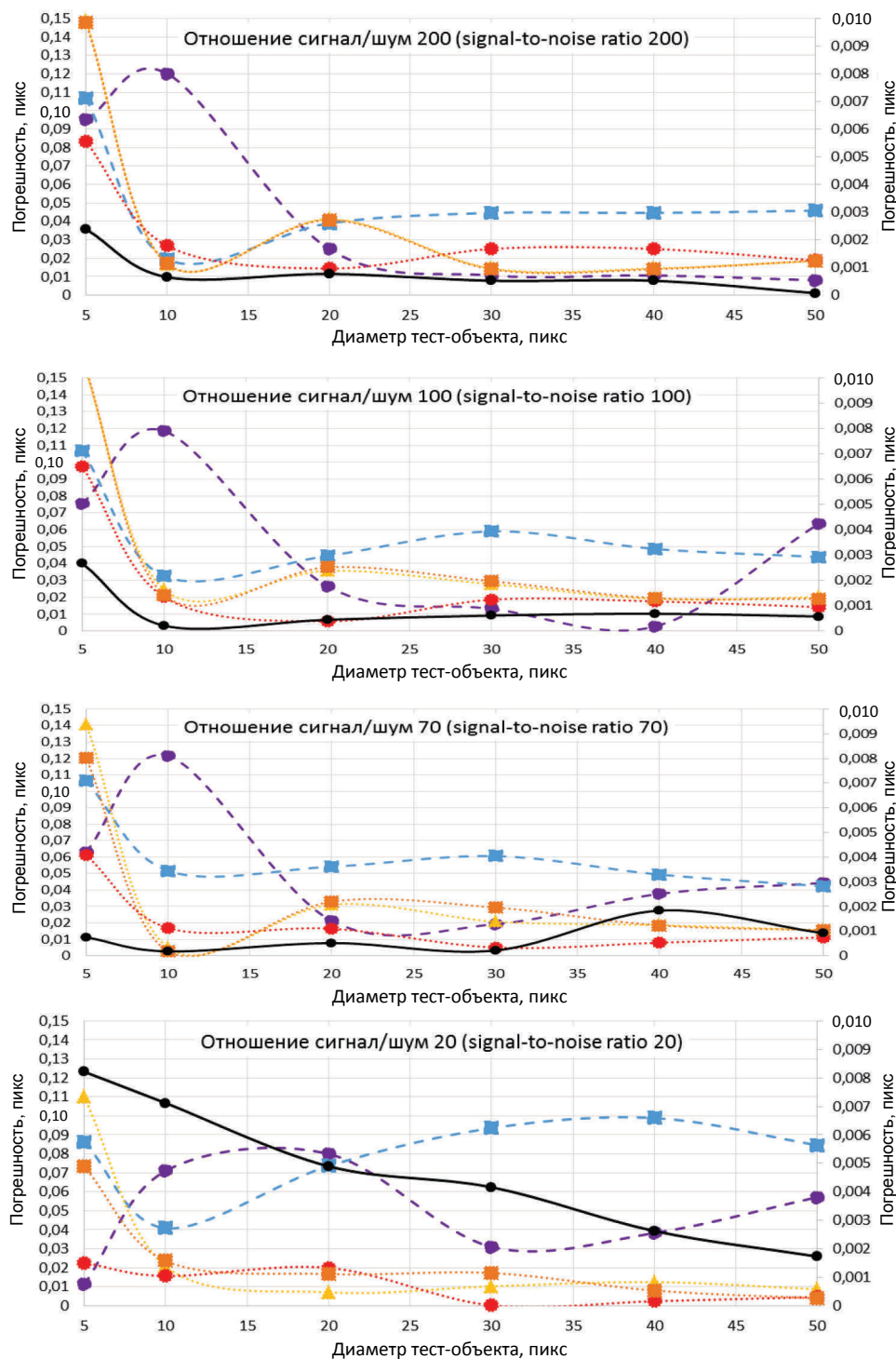


Рис. 2. Погрешность (ось ординат) определения центра изображения тест-объекта на фотоприемнике различными алгоритмами для разных диаметров (ось абсцисс)

Fig. 2. Error (ordinate axis) for determination of test-object image center on photodetector while using various algorithms for different diameters (abscissa axis)

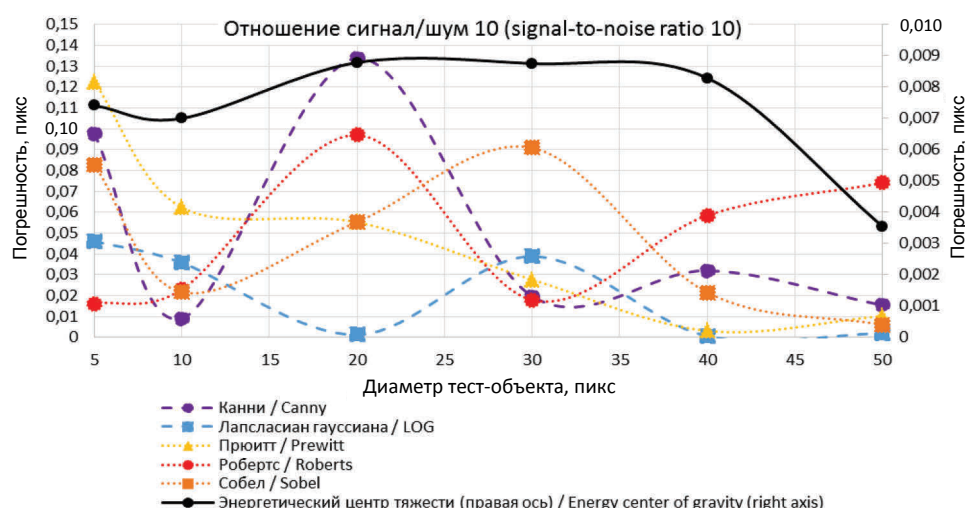


Рис. 2. Окончание

Fig. 2. Termination

Как видно из рис. 2, точность определения координат по энергетическому центру тяжести превосходит контурные алгоритмы для всех рассмотренных диаметров тест-объекта и отношений сигнал/шум примерно на порядок.

С увеличением отношения сигнал/шум улучшается точность определения координат на 0,5–1 порядок. Улучшение точности с увеличением диаметра тест-объекта наиболее характерно для больших отношений сигнал/шум: 70 и более. В этом случае для детектора Канни характерное улучшение точности заметно для тест-объектов диаметром 20 пикс и более, для остальных – 10 пикс и более.

Для тест-объектов диаметром 10 пикс и менее в детекторах Канни и лапласиан гауссиана погрешность оказывается постоянной и, следовательно, СКО равняется нулю при выборке 100, в отличие от других детекторов.

Уступают контурные алгоритмы по величине вычислительных мощностей (табл. 1), на каж-

дый из которых необходимо, по сравнению с энергетическим алгоритмом, затратить больше времени, в частности за счет дополнительной операции аппроксимации окружностью и проведения нескольких итераций во время расчета. Значения необходимых вычислительных мощностей определялись средствами MatLab по затрачиваемому времени вычислений на каждый алгоритм.

ВЫВОДЫ

1. Математически смоделирована оптическая схема коллиматора, проецирующего тест-объект на фотоприемник оптико-электронного прибора с параметрами, которые часто встречаются в реальных схемах контроля. Для сравнения алгоритмов определения координат изображений проведен численный расчет для отношений сигнал/шум 200, 100, 70, 20, 10 и диаметров тест-объекта 5, 10, 20, 30, 40, 50 пикс с учетом шумов фотоприемника. Установка порога, значения яркости ниже которого принимались нулю, и применение фильтра Винера с подобранными параметрами позволяют сгладить изображение и устранить влияние шумов на автоматическое определение контура. Это дает возможность однозначно его идентифицировать, т. е. исключить определение ложных контуров, а также повысить точность алгоритма определения координат по центру тяжести от 1 до 2 порядков.

Таблица 1

Сравнение алгоритмов по величине вычислительных мощностей

Comparison of algorithms according to computing power values

Энергетический	Алгоритм				
	Контурный				
	Канни	Лапласиан гауссиана	Прюитт	Робертс	Собел
x	14,4x	14,1x	12,5x	12,5x	12,2x

2. Алгоритм определения по энергетическому центру тяжести оказался точнее контурных алгоритмов, а также требующим меньших вычислительных мощностей. Главной причиной меньшей точности контурных алгоритмов является дискретность определения контура.

3. Для определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах целесообразнее использовать алгоритм определения по энергетическому центру тяжести по сравнению с контурными алгоритмами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старосотников, Н. О. Высокоточный цифровой автоколлиматор для измерения малых углов / Н. О. Старосотников // Новые направления развития приборостроения: материалы 7-й Междунар. студ. науч.-техн. конф., 23–25 апр. 2014 г. Минск: БНТУ, 2014. С. 244.
2. Jinyun Yan, Jie Jiang, Guangjun Zhang (2016) Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker / Yan Jinyun, Jiang Jie, Zhang Guangjun // *Optics Express*. 2016. Vol. 24, Iss. 6. P. 5961–5983. DOI: 10.1364/oe.24.005961.
3. Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack–Hartmann Wavefront Sensor / Xiaoming Yin [et al.] // *Applied Optics*. 2009. Vol. 48, Iss. 32, P. 6088–6098. DOI: 10.1364/ao.48.006088.
4. Фотограмметрические параметры оптико-электронной аппаратуры / С. А. Архипов [и др.] // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 4. С. 105–115.
5. Старосотников, Н. О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. 2015. № 5. С. 71–76.
6. Accurate Projector Calibration Based on a New Point-to-Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images / Huang Zhengrong [et al.] // *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, Iss. 3. P. 347–356. DOI: 10.1364/ao.54.000347.
7. Старосотников, Н. О. Метод снижения влияния шумов фонового сигнала при определении координат энергетического центра тяжести изображения в ОЭП / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Приборостроение-2016: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., 23–25 нояб. 2016 г. Минск: БНТУ, 2016. С. 133–135.
8. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab; пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. М.: Изд-во «Техносфера», 2006. 616 с.
9. Determination of Ocular Torsion by Means of Automatic Pattern Recognition / E. Groe [et al.] // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1996. Vol. 43, Iss. 5. P. 471–479. DOI: 10.1109/10.488795.
10. Canny, J. A Computational Approach to Edge Detection / J. Canny // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. PAMI-8, Iss. 6, Nov. P. 679–698. DOI: 10.1109/tpami.1986.4767851. DOI: 10.1109/tpami.1986.4767851.

Поступила 14.08.2017
Подписана в печать 10.11.2017
Опубликована онлайн 29.01.2018

REFERENCES

1. Starosotnikau N. O. (2014) Highly-Accurate Digital Autocollimator for Measuring Small Angles. *Novye Napravleniya Razvitiya Priborostroeniya: Materialy 7-i Mezhdunarodnoi Studencheskoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii, 23–25 Aprelya 2014 g.* [New Directions in Instrumentation Development: Materials of the 7th International Students' Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 244 (in Russian).
2. Jinyun Yan, Jie Jiang, Guangjun Zhang (2016) Dynamic Imaging Model and Parameter Optimization for a Star Tracker. *Optics Express*, 24 (6), 5961–5983. DOI: 10.1364/oe.24.005961.
3. Xiaoming Yin, Xiang Li, Liping Zhao, Zhongping Fang (2009) Adaptive Thresholding and Dynamic Windowing Method for Automatic Centroid Detection of Digital Shack–Hartmann Wavefront Sensor. *Applied Optics*, 48 (32), 6088–6098. DOI: 10.1364/ao.48.006088.
4. Arkhipov S. A., Gasitch G. V., Zavarzin V. I., Morozov S. A. (2008) Photogrammetric Parameters of Optical and Electronic Apparatus. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni N. E. Baumana = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, (4), 105–115 (in Russian).
5. Starosotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2015) Estimation of Accurate Determination for Coordinates of Gravity Energy Center in Collimator Test-Object in Respect of Control Schemes for Optoelectronic Devices with Matrix Photodetectors. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (5), 71–76 (in Russian).
6. Zhengrong Huang, Jiangtao Xi, Yanguang Yu, Qinghua Guo (2015) Accurate Projector Calibration Based on a New Point-to-Point Mapping Relationship Between the Camera and Projector Images. *Applied Optics*, 54 (3), 347–356. DOI: 10.1364/ao.54.000347.
7. Starosotnikau N. O., Feodortsau R. V. (2016) Method for Decreasing Influence of Background Signal Noise while Determining Energy Gravity Centre Coordinates for Images in Electrooptical Devices. *Priborostroenie-2016: Materialy 9-i Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. Konferentsii, 23–25 Noyabrya 2016 g.* [Instrumentation-2016: Materials of the 9th International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 133–135 (in Russian).
8. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. (2004) *Digital Image Processing Using MatLab*. New Jersey, Prentice Hall.
9. Groen E., Bos J. E., Nacken P.F.M., de Graaf B. (1996) Determination of Ocular Torsion by Means of Automatic Pattern Recognition. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43 (5), 471–479. DOI: 10.1109/10.488795.
10. Canny J. (1986) A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8 (6), 679–698. DOI: 10.1109/tpami.1986.4767851.

Received: 14.08.2017

Accepted: 10.11.2017

Published online: 29.01.2018