

ИМИТАЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ КООРДИНАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО В СОСТАВЕ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Глеб Андреевич Акилин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (965)829-79-15, e-mail: akilin-ap@yandex.ru

Владимир Александрович Федоров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (913)712-78-46, e-mail: web.sgugit.fedorov@gmail.com

Евгений Владимирович Грицкевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, тел. (383)343-91-11, e-mail: gricew@mail.ru

Полина Александровна Звягинцева

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности, тел. (923)135-79-78, e-mail: polinasgugit@mail.ru

Рассматривается имитационная компьютерная модель оптико-электронного измерителя координат точечных объектов, входящего в систему распознавания субъекта по биометрическим признакам. Представляемая модель позволяет виртуально исследовать и анализировать процессы функционирования координатора, что обеспечивает оптимальное согласование параметров и характеристик различных звеньев устройства, а также дает возможность выбора наиболее эффективного алгоритма обработки результирующего цифрового изображения по критерию минимизации погрешности измерения координат отдельного точечного объекта. В основу моделирования положен метод многократных статистических испытаний Монте-Карло, позволяющий наиболее точно отобразить шумовые процессы, возникающие при приеме и преобразовании оптической информации в оптико-электронном тракте координатного устройства, поскольку именно эти процессы при прочих равных условиях вносят решающий вклад в конечную погрешность измерений. Описываются принципы работы модели и обсуждаются полученные результаты, а также перспективы развития модели для решения задач оптимального системотехнического проектирования биометрических систем распознавания.

Ключевые слова: имитационная компьютерная модель, измерение координат, точечный объект, погрешность измерения.

COORDINATOR SIMULATION COMPUTER MODEL WORKING AS APART OF BIOMETRIC RECOGNITION SYSTEM

Gleb A. Akilin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (965)829-79-15, e-mail: akilin-ap@yandex.ru

Vladimir A. Fedorov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (913)712-78-46, e-mail: web.sgugit.fedorov@gmail.com

Evgeny V. Gritskovich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Information Security, phone: (383)343-91-11, e-mail: gricew@mail.ru

Polina A. Zviagintseva

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Information Security, phone: (923)135-79-78, e-mail: polinasgugit@mail.ru

Simulation computer model of an optoelectronic coordinate measurer for point objects is considered that is a part of the subject recognition system based on biometric features. The presented model allows you to virtually explore and analyze the processes of functioning of the coordinator, which ensures optimal coordination of parameters and characteristics of various parts of the device, as well as to choose the most effective algorithm for processing the resulting digital image by minimizing the error of measuring the coordinates of a single point object. The simulation is based on the Monte Carlo method of multiple statistical tests, which provides most accurate representation of noise processes that occur when receiving and converting optical information in the optical-electronic path of a coordinate device, since these processes, under solid equal conditions, make a decisive contribution to the final measurement error. The principles of the model are described and the results obtained are discussed, as well as the future development of the model and its application for solving problems of optimal system design of biometric recognition systems.

Key words: computer simulation model, measurement of coordinates, point object, measurement error.

Введение

В основе решения задач распознавания объектов биометрическими системами, как правило, лежат методы измерения координат отдельных контрольных точек [1], выделяемых в исследуемом и эталонном изображениях. Именно координирование таких точек является первым этапом обработки изображений, реализующих по результатам этой операции процедуру распознавания [2–5]. Примером одного из таких изображений может являться модель лица (рис. 1), полученная из открытых интернет-источников.

В качестве других примеров можно назвать папиллярные узоры пальцев рук и ладоней, текстуру сетчатки глаза и т.п., поскольку в этих случаях задачи распознавания приходится решать, учитывая соотношения расстояний между отдельными линиями вдоль прямых координатной сетки, что требует координирования точек пересечения линий и прямых.



Рис. 1. Пример геометрической модели лица, используемой при решении задачи распознавания

Такие биометрические системы распознавания работают по принципу выявления геометрического подобия контрольного и эталонного изображений. Под распознаванием здесь будет подразумеваться решение задач идентификации и верификации (аутентификации) субъекта [1, 5].

Из вышесказанного следует, что нахождение точных координат точечного объекта является важнейшей задачей, решаемой на первом этапе процедуры распознавания биометрической системой, и определяет конечный результат ее работы. Для выполнения этого этапа используются системы технического зрения (оптико-электронные системы) измерения координат (координаторы), как правило, создаваемые на базе матричных фотоприемников [6]. Такие системы имеют в своем составе специализированные микропроцессоры, обеспечивающие обработку сигналов, поступающих с выхода фотоприемника. Координаторы являются сложными устройствами, состоящими из звеньев различной физической природы и обеспечивающими преобразование и обработку как первичных оптических сигналов, так и вторичных электрических (аналоговых и цифровых).

Системотехническое проектирование подобных устройств, по сути, сводится к такому оптимальному согласованию параметров и характеристик звеньев оптико-электронного тракта, которое бы обеспечивало минимальную погрешность измерения координат точечного объекта. Наиболее значимым фактором, влияющим на величину погрешности, являются случайные флуктуации детектируемых сигналов, или шумы. Поэтому для оптимального согласования целесообразно использовать имитационную компьютерную модель измерителя координат, обеспечивающую проведение многократных статистических испытаний по методу Монте-Карло [7].

Метод моделирования

Описываемый метод строится на предположении, что, если моделируемая система обеспечивает минимально возможную погрешность измерения координат изображения одиночной светящейся точки, создаваемого объективом в плос-

кости фотоприемной матрицы, то эта же система обеспечит минимальную погрешность определения координат и для изображений любых других точек, в том числе, имеющих яркость ниже окружающего их фона (темных точек на светлом фоне). Во всяком случае, на предварительном этапе обработки исходного цифрового изображения всегда можно инвертировать его по интенсивности. Поскольку любое изображение представляется совокупностью точек разной интенсивности, то допуская предположение можно принять в качестве реально реализуемого на практике.

Пусть приемная оптическая система строит изображение точечного источника излучения в виде абберационного и дифракционного кружка рассеяния радиусом r_s , причем параметр r_s соответствует энергии излучения, распределенной в этом кружке на уровне 0,606 от максимальной ($1 / \sqrt{e}$). Положение максимума в кружке и будет являться искомым положением изображения точки. При этом считается, что распределение освещенности для кружка описывается гауссовой функцией вида [8, 9]:

$$E(x, y) = E_{\max} \exp\left\{-[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] / 2\pi r_s^2\right\}, \quad (1)$$

где E_{\max} – максимальная освещенность в кружке рассеяния для координат x_0 и y_0 (истинных).

Ниже условно показано распределение зарядовых пакетов в сечении по горизонтальной или вертикальной оси координат (рис. 2), накапливаемых тремя пикселями соответственно строки или столбца матрицы при формировании изображения точки с радиусом значительно меньшим шага матричного растра. Соответственно, сдвиг изображения точки в пределах пикселя не приведет к перераспределению зарядов в этих пикселях. Сдвинутое изображение представлено пунктирной кривой. Под теми элементами, на которые не попадает излучение, будут накапливаться только темновые заряды.

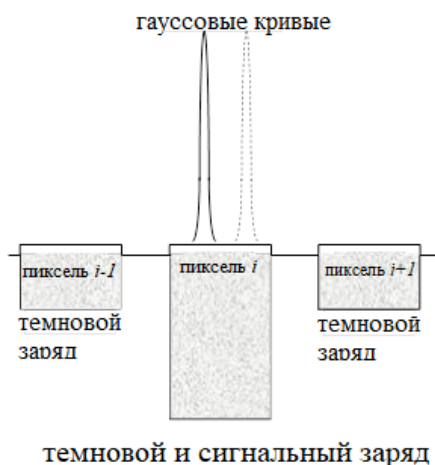


Рис. 2. Условное распределение накапливаемых зарядовых пакетов в трех смежных пикселях фотоприемной матрицы при малом кружке рассеяния

Очевидно, что если изображение точки попадет в зазор между пикселями, то оно будет потеряно. Погрешность измерения в этом случае определяется размерами пикселя. Если же размер кружка рассеяния захватывает несколько смежных пикселей, то сдвиг изображения приведет к перераспределению зарядов, накапливаемых каждым пикселем (рис. 3), что также изображено пунктирными линиями.

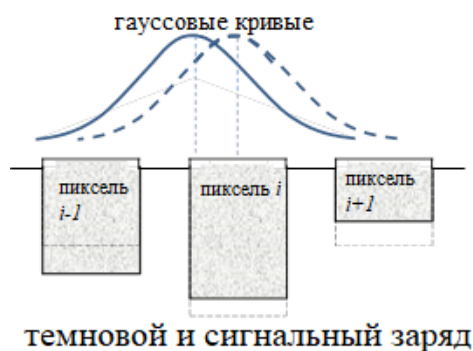


Рис. 3. Условное распределение накапливаемых зарядовых пакетов в трех смежных пикселях фотоприемной матрицы при большом кружке рассеяния

Именно изменение дисбаланса зарядов, накапливаемых смежными пикселями, позволяет применить один из интерполяционных алгоритмов [9] для определения положения энергетического центра пятна рассеяния. Но прежде, чем приступить к описанию этой процедуры, необходимо учесть, что накопление одного (текущего) кадра фотоприемной матрицей сопровождается шумовыми процессами, искажающими идеальную картину распределения зарядов в пикселях и, соответственно, вносящими погрешность в процедуру измерения координат в каждом кадре. Поэтому на идеальное распределение зарядовых пакетов необходимо наложить случайное распределение их флуктуаций для каждого кадра. Значение (разброс значений) этих флуктуаций определяется шумовыми параметрами фотоприемной матрицы и разделяется на аддитивную (для темновых зарядов) и мультипликативную (для сигнальных зарядов) составляющие.

Если, например, энергетический центр пятна рассеяния находится в центре пикселя, то, естественно, распределение зарядовых пакетов в смежных пикселях для идеального случая отсутствия шумов будет симметричным. При наличии же шумов возникнет асимметрия, которая и приведет к ошибке в определении истинных координат точки.

Процесс моделирования для каждого кадра реализуется следующим образом. В плоскости матрицы генерируются случайные координаты точки. Относительно этой точки строится пространственная гауссоида распределения освещенности. Для каждого пикселя матрицы рассчитывается интегральное значение накапливаемого заряда, определяемое долей оптического излучения, падающего на пиксель, и преобразовательными свойствами фотоприемного устройства. По сути, вычисляется свертка изображения точки и раstra матрицы. Затем для каж-

дого пикселя генерируется два случайных числа, определяющих флуктуации темнового и сигнального зарядов. В полученном таким образом электронном изображении определяется элемент с максимальным зарядом, относительно которого выделяются строка и столбец матрицы, по которым и происходит вычисление координаты энергетического центра пятна рассеяния.

Это вычисление для каждой координаты производится по формулам:

$$x'_0 = \left[\sum_{i=1}^M x_i \cdot Q(x_i) \right] / \left[\sum_{i=1}^M Q(x_i) \right], \quad (2)$$

$$y'_0 = \left[\sum_{j=1}^M y_j \cdot Q(y_j) \right] / \left[\sum_{j=1}^M Q(y_j) \right], \quad (3)$$

где $Q(x_i)$ и $Q(y_j)$ – сигналы, сгенерированные в i -том пикселе выделенной строки и j -том пикселе выделенного столбца, M – количество столбцов (элементов в строке), N – количество строк (элементов в столбце), x_i – координаты центра i -го пикселя выделенной строки по горизонтальной оси, y_j – координаты центра j -го пикселя выделенного столбца по вертикальной оси. После этого определяются текущие погрешности измерения $\Delta x = x_0 - x'_0$ и $\Delta y = y_0 - y'_0$, по которым накапливается дисперсия. При выходе из цикла многократных статистических испытаний рассчитываются соответствующие среднеквадратичные отклонения, которые и принимаются за погрешность измерения.

Очевидно, что при вычислении значений накапливаемых в отдельных пикселях сигналов $Q(x_i)$ и $Q(y_j)$ используются параметры и характеристики преобразующих звеньев оптико-электронного тракта. Описание процедур этих вычислений относится к области энергетических расчетов оптико-электронных систем [8,10] и выходит за рамки данной работы. Варьируя значениями этих параметров и характеристик в их рабочих диапазонах, можно получить зависимости, позволяющие определить оптимальные значения параметров и характеристик, обеспечивающие минимизацию погрешностей измерения координат, как это и будет показано в следующем разделе.

Необходимо остановиться на тех ограничениях, упрощениях и допущениях, которые были сделаны при реализации описываемой модели. Как уже было сказано выше, распределение энергии в кружке рассеяния предполагалось гауссовским. Не рассматривалось изменение размеров и формы пятна рассеивания при перемещении от центра поля зрения на периферию фотоприемной матрицы, то есть считалось, что система работает только в параксиальной области приемной оптической системы. Генерируемые шумы предполагались белыми и не разделялись по месту их возникновения, а учитывались интегрально. Тем не менее, даже такая упрощенная модель позволила получить ряд интересных результатов, показывающих перспективность предлагаемого подхода.

Результаты моделирования

Описанная выше модель была реализована на языке программирования MATLAB и использована в качестве инструмента для нахождения оптимальных значений некоторых параметров отдельных звеньев измерительной системы, которые возможно контролировать (изменять) при настройке и эксплуатации системы.

Например, очевидным является тот факт, что на погрешность измерения оказывает влияние соотношение радиуса кружка рассеяния приемной оптической системы и параметров раstra матрицы. Выше уже было показано, что при значениях размера этого кружка меньших, чем размеры пикселя, погрешность измерения определяется именно размерами пикселя. И только увеличение кружка рассеяния (а это равносильно ухудшению качества оптической системы) создает возможность уменьшения погрешности за счет вовлечения в процесс обработки большего количества элементов разложения изображения. Но необходимо учитывать, что при слишком больших значениях радиуса, энергия излучения в кружке распределяется по большей площади, и это приведет к уменьшению сигнала на каждом задействованном в процесс обработки элементе разложения. Это отчетливо видно на приведенных ниже экранных копиях (рис. 4, 5), отображающих результаты моделирования (по одной из координат). В верхней части обоих рисунков приведены соответствующие гауссовские кривые, аппроксимирующие распределение энергии излучения в кружке рассеяния по выбранной координате, а в нижней части – распределения зарядовых пакетов по пикселям строки(столбца) с учетом шумов.

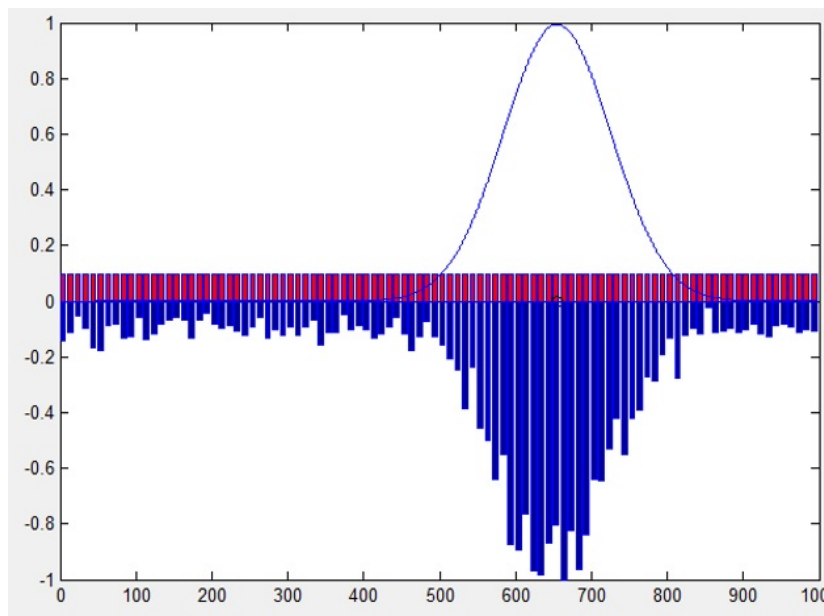


Рис. 4. Распределение энергии излучения (верхняя часть изображения) и зарядовых пакетов (нижняя часть изображения) по пикселям строки (столбца) матрицы при наличии шумов. Малый радиус кружка рассеяния (экранная копия)

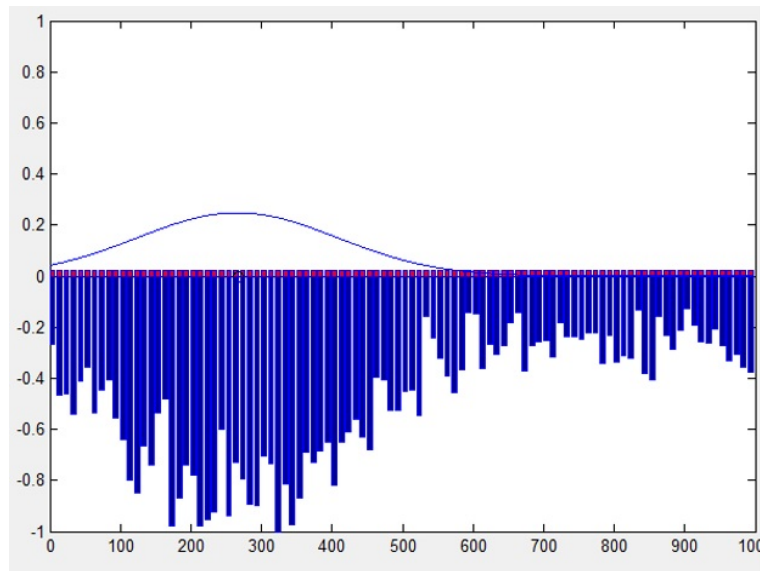


Рис. 5. Распределение энергии излучения (верхняя часть изображения) и зарядовых пакетов (нижняя часть изображения) по пикселям строки (столбца) матрицы при наличии шумов. Большой радиус кружка рассеяния (экранный снимок)

В конечном итоге при дальнейшем увеличении размеров кружка разница между сигналами соседних элементов станет меньше величины шумовой составляющей, что приведет к потере точности. Таким образом, должен существовать оптимальный размер кружка рассеяния, обеспечивающий минимальную погрешность измерения.

Для подтверждения этой гипотезы был проведен модельный эксперимент, результаты которого показаны ниже (рис. 6).

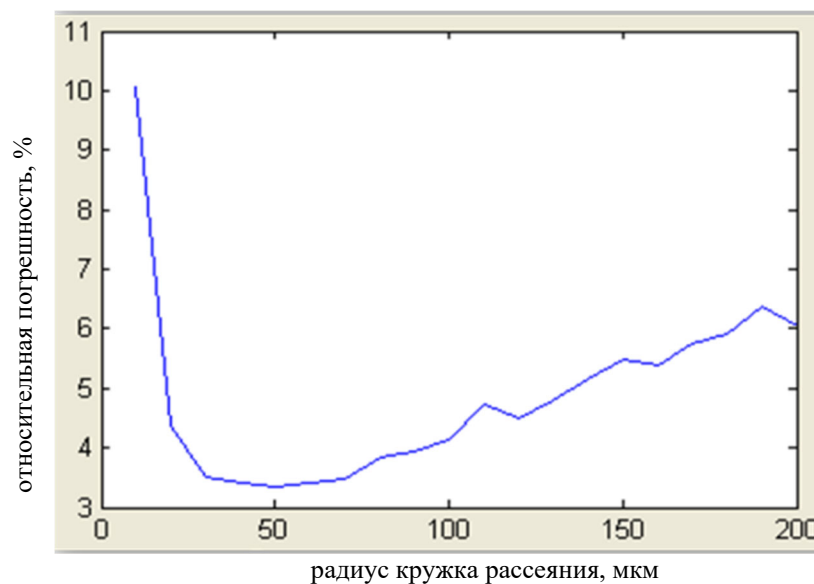


Рис. 6. Результаты модельного эксперимента по определению оптимального радиуса кружка рассеяния приемной оптической системы (экранный снимок)

Радиус кружка рассеяния изменялся дискретно от 10 до 200 мкм через 10 мкм. По вертикальной оси откладывались значения относительных погрешностей (относительно шага расположения элементов матрицы). Размер этого шага составлял 60 мкм, а размер элемента (пикселя) – 56 мкм. Всего в обработке участвовало 10 элементов строки. Темновой заряд каждого элемента составлял 0,01 от величины максимального сигнала, накапливаемого каждым элементом и определяемого глубиной потенциальной ямы, а доля шумовой составляющей определялась как 0,1 от темнового, и от сигнального зарядов. Оптимальное значение радиуса кружка рассеяния составило 50 мкм.

Другой модельный эксперимент проводился с целью определения оптимального количества пикселей, участвующих в обработке сигналов (количества элементов выборки). В приведенных выше выражениях (2) и (3) предполагалось, что обрабатываться будут все элементы строки или столбца матрицы. Но при зафиксированном размере кружка рассеяния такое решение не является оптимальным, поскольку включение в процесс обработки периферийных элементов, на которых практически отсутствует излучение от точечного источника, приведет лишь к возрастанию влияния шумовых сигналов на погрешность измерения. Кроме того, слишком большое количество обрабатываемых пикселей увеличит время обработки, которая, скорее всего, должна происходить в режиме on-line. Если же будет задействовано недостаточное количество элементов выборки, то это не обеспечит минимальную погрешность измерения.

Далее приведены результаты соответствующего модельного эксперимента (рис. 7). По вертикальной оси по-прежнему откладывалось значение относительной погрешности, а по горизонтальной – приведенное значение используемых при обработке элементов по отношению к максимальному числу пикселей строки (столбца).

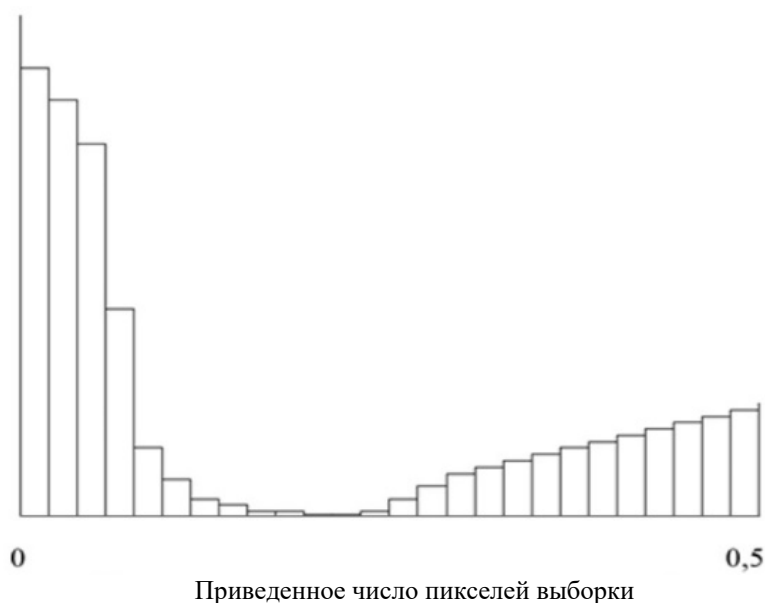


Рис. 7. Результаты модельного эксперимента по определению оптимального количества элементов выборки

Как и в предыдущем случае, очевидным является наличие явно выраженного минимума анализируемой зависимости.

Заключение

Приведенные выше результаты модельных экспериментов подтверждают возможность использования описываемой модели для виртуального анализа систем измерения координат с целью оптимального согласования параметров различных звеньев системы по критерию минимизации погрешности измерений. Конечно, описанная модель является демонстрационной и не предназначена для практического исследования реальных систем. Но, в то же время, соответствующая доработка и наполнение модели конкретными данными приведет к появлению инструмента, способного обеспечить оптимальное системотехническое проектирование измерительных оптико-электронных устройств, входящих в состав биометрических систем распознавания.

Необходимо также добавить, что выражения (2) и (3) реализуют в модели эмуляцию наиболее простого (но и наиболее быстрого) алгоритма обработки, традиционно называемого методом определения энергетического центра. Расширение возможностей модели предполагает создание программы-эмулятора, позволяющей использовать более сложные (и более точные) алгоритмы обработки, например, упомянутые в работе [9], с целью выбора наиболее эффективного алгоритма для конкретной реальной ситуации.

Процесс дальнейшего уточнения и совершенствования модели в настоящее время продолжается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-5-2013 Информационные технологии (ИТ). Биометрия. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 5. Данные изображения лица (с Изменением № 1) [Текст] : нац. стандарт РФ. – Введ. 01.01.2015. – Стандартиформ, 2015. – 118 с.
2. De Vel O., Aeberhard S. Line-based face recognition under varying pose // IEEE Transactions on PAMI. 1999. Vol. 21. No 10, P. 1081–1088.
3. Dakin S. C., Watt R. J. Biological «bar codes» in human faces // Journal of Vision. 2009. Vol. 9. No 4(2), P. 1–10.
4. Forezmancki P., Kukharev G. Comparative analysis of simple facial features extractors // Journal Real-Time Image Processing. 2007. No 1, P. 239–255.
5. Кухарев, Г. А. Методы обработки и распознавания изображений лиц в задачах биометрии [Текст] / Г. А. Кухарев, Е. И. Каменская, Ю. Н. Матвеев, Н. Л. Щеголева; под ред. М. В. Хитрова. – СПб.: Политехника, 2013. – 388 с.
6. Малинин, В. В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами [Текст] / В. В. Малинин. – Новосибирск: Наука, 2005. – 256 с.
7. Торшина, И. П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации [Текст] / И. П. Торшина. – М.: Университетская книга: Логос, 2009. – 248 с.
8. Якушенков, Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения [Текст] / Ю. Г. Якушенков. – М.: Логос, 2013. – 376 с.

9. Жуков, Д. В. Итерационный алгоритм для определения координат изображений точечных излучателей [Текст] / Д. В. Жуков, И. А. Коняхин, А. А. Усик // Оптический журнал. – 2009 . – № 1 (76). – С. 36–38.

10. Ишанин, Г. Г. Приемники оптического излучения [Текст]: Учебник / Г. Г. Ишанин, В. П. Челибанов; под ред. В. В. Коротаева. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 304 с.

©Г. А. Акилин, В. А. Федоров, Е. В. Грицкевич, П. А. Звягинцева, 2020