



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-38-43>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932.2

МЕТОДИКА СУБПИКСЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛОЖЕНИЯ КРАЯ ПОВЫШЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОШАБЛОНА НА ПРОСВЕТ

ЛАПКО А.В.¹, ДЕДКОВ А.И.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь
²ОАО «КБТЭМ-ОМО», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19 сентября 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Предложена методика субпиксельной обработки положения края повышенного разрешения при регистрации объекта на просвет. Осуществлено имитационное моделирование результатов субпиксельной регистрации на примере идеальной системы регистрации. Установлены ограничения работы системы в условиях высокой и низкой освещенности, сформулированы условия стабильной работы системы. Исследовано поведение системы при регистрации полупрозрачных объектов, осуществлена оценка значения среднеквадратичного отклонения σ_{sub} для результатов моделирования работы идеальной системы регистрации на 8-битовой ПЗС-линейке. Проведены оценочные расчеты среднеквадратичного отклонения σ_{sub} для 12-битовой ПЗС-линейки.

Ключевые слова: субпиксельная обработка, положение края, пиксель, интенсивность света.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лапко А.В., Дедков А.И. Методика субпиксельной обработки положения края повышенного разрешения при регистрации объекта на просвет. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 38-43.

METHOD OF SUBPIXEL PROCESSING OF HIGH RESOLUTION EDGE DURING CLEARANCE PHOTOSHOP REGISTRATION

LAPKO A.V.¹, DEDKOV A.I.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
²OJSC KBTEM-OMO, Republic of Belarus

Submitted 19 September 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The technique of subpixel processing of the position of the edge with increased resolution when the object is registered for lumen is proposed. Simulation modeling of the results of subpixel registration is carried out on the example of an ideal registration system. The limitations of the system operation in high

and low light conditions are established, the conditions of stable operation of the system are formulated. The behavior of the system in the registration of translucent objects is studied, the value of the standard deviation σ_{sub} is estimated for the results of modeling the ideal registration system on the 8-bit CCD-line. The estimated calculations of the standard deviation σ_{sub} for the 12-bit CCD-line are carried out.

Keywords: subpixel processing, periphery location, pixel, luminous intensity.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Lapko A.V., Dedkov A.I. Method of subpixel processing of high resolution edge during clearance object registration. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 38-43.

Введение

Получение цифрового изображения высокого разрешения – актуальная задача для многих сфер применения компьютерного зрения. При этом наименьшая физическая величина цифрового изображения – пиксель. Однако не всегда край изображения попадает на край пикселя. В таких случаях необходимо применение алгоритмов субпиксельной регистрации, повышающих разрешающую способность используемых приборов. Существующие алгоритмы повышения разрешающей способности регистрирующих приборов и увеличивающие четкость изображения [1–6] имеют целью корректировку отраженного от объекта изображения. Ведутся исследования по субпиксельной обработке изображений для ПЗС (прибор с зарядовой связью) матриц с нетрадиционной формой и взаимным расположением пикселей [7], а также по применению нейронных сетей для субпиксельной обработки изображений [8]. Авторы [9] рассматривают способы расчета погрешностей при субпиксельной регистрации.

Целью настоящего исследования явилась разработка методики субпиксельной обработки положения края повышенного разрешения при регистрации элементов фотошаблона на просвет и имитационное моделирование для оценки результата этой обработки.

Методика эксперимента

Методика субпиксельной обработки разрабатывалась для случая регистрации элементов фотошаблона с помощью цифрового приемника: ПЗС-линейки. Рассмотрен вариант регистрации фотошаблона на просвет, то есть регистрации тени фотошаблона. В этом случае схема идеальной системы регистрации фотошаблона изображена на рис. 1.

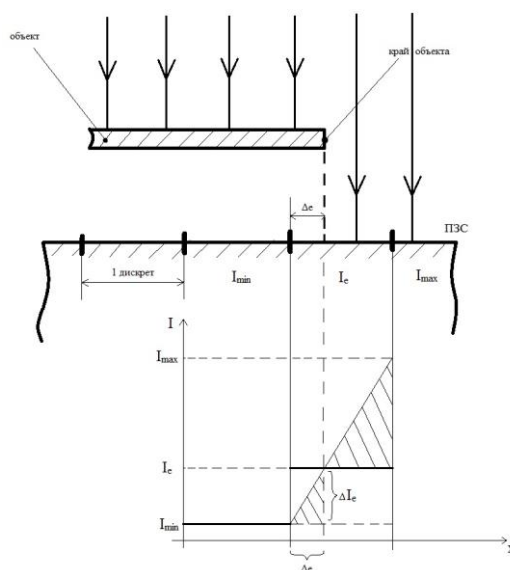


Рис. 1. Идеальная система регистрации объекта
Fig. 1. Ideal registration system

Край элемента фотошаблона перекрывает площадь пиксела ПЗС-линейки частично, причем чем больше перекрытие, тем меньшая интенсивность света I приходит на сам элемент. Зависимость линейная (рис. 1). Таким образом, будут выполняться следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta_e &= \frac{1}{I_{\max} - I_{\min}}, \\ \Delta_e &= \frac{I_e - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Реальное перекрытие краем пиксела ПЗС-линейки соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta_{sub} &= 1 - \Delta_e; \\ \Delta_{sub} &= \frac{I_{\max} - I_e}{I_{\max} - I_{\min}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, используя уравнение (2), можно вычислить положение края элемента фотошаблона с точностью, превышающей дискрет ПЗС-линейки (или определить процент затененной площади пиксела).

Проверка формул осуществлялась при помощи имитационного моделирования в Matlab. Исследовалась выборка из 500 испытаний с использованием модели равномерного шума с $\sigma_n = 0,25$, т. е. регистрация интенсивности в модели проходила с точностью, равной 1. Отклонения были заданы с использованием функции `random()`. Имитационное моделирование осуществлялось при следующих исходных данных: $I_e = 140$; $I_{\min} = 50$; $I_{\max} = 200$. Значения интенсивности света I приняты в условных единицах. При этом $I = 0$ – это минимальная интенсивность света или нижний порог чувствительности ПЗС-линейки, а $I = 256$ – верхний порог чувствительности.

Кроме того, путем расчетов были оценены факторы, влияющие на точность вычислений: интенсивность света выше порога чувствительности ПЗС-линейки, интенсивность света ниже порога чувствительности ПЗС-линейки.

Результаты и обсуждение

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2. Расчетная среднеквадратичная ошибка $\sigma_{sub} = 0,0023$.

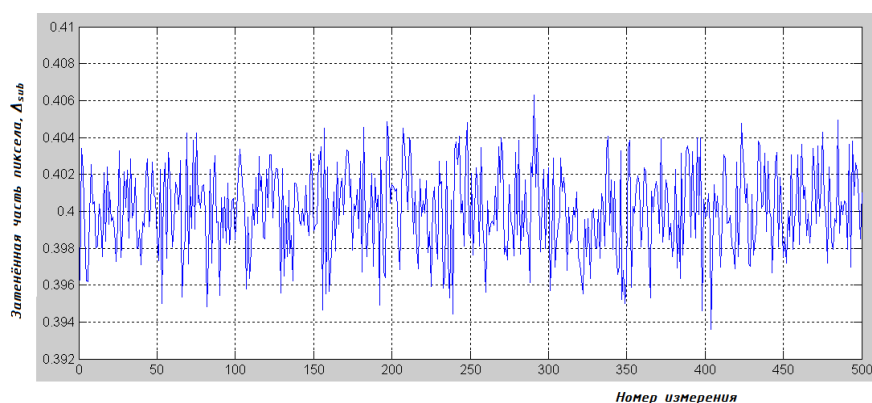


Рис. 2. Результаты имитационного моделирования при $I_e = 140$; $I_{\min} = 50$; $I_{\max} = 200$
 Fig. 2. The results of simulation modeling at $I_e = 140$; $I_{\min} = 50$; $I_{\max} = 200$

ПЗС-линейка является дискретной квантованной системой регистрации интенсивности оптического излучения. В случае 8-битового АЦП получаем 256 градаций квантования интенсивности. Предположим, что уровень темного – 50 условных единиц, уровень светлого – 200 условных единиц. Нормальная случайная величина принимает

значения, отклоняющиеся от ее математического ожидания не более чем на 3 сигма. Тогда положение края на рассматриваемой системе можно рассчитать с точностью:

$$3\sigma_{sub} = \frac{1}{I_{max} - I_{min}};$$

$$\sigma_{sub} = \frac{1}{3(I_{max} - I_{min})}. \quad (3)$$

Подставляя конкретные значения, получим:

$$3\sigma_{sub} = \frac{1}{200 - 50} = \frac{1}{150} = 0,0067;$$

$$\sigma_{sub} = 0,0022.$$

Таким образом, можно видеть, что результаты имитационного моделирования согласуются с расчетом по формуле (3).

Проанализируем поведение идеальной системы регистрации при работе в условиях избыточной и недостаточной интенсивности света I .

При слишком высоком уровне освещенности 8-битовая ПЗС-линейка все интенсивности выше порога чувствительности будет воспринимать как максимальную интенсивность и выдавать на выход уровень 255. Это приведет к ошибочному расчету положения края. Рассмотрим пример: $I_e = 140$; $I_{min} = 50$; $I_{max} = 270$. Расчет по формуле (2) даст в результате $\Delta_{sub} = 0,59$. Однако в случае, если максимальная интенсивность будет зарегистрирована как уровень 255, то мы получим $\Delta_{sub} = 0,56$, что не соответствует действительности.

С другой стороны, при недостатке освещенности 8-битовая ПЗС-линейка все интенсивности ниже нижнего порога чувствительности будет воспринимать как минимальную интенсивность и выдавать на выход уровень 0. Это тоже приведет к ошибочному расчету положения края. Рассмотрим следующий пример: $I_e = 140$; $I_{min} = -50$; $I_{max} = 200$. Расчет по формуле (2) даст $\Delta_{sub} = 0,24$. Однако в случае, если минимальная интенсивность будет зарегистрирована как уровень 0, то мы получим $\Delta_{sub} = 0,30$, что также не соответствует действительности.

Таким образом, диапазон чувствительности системы для минимизации ошибки пространственного положения D_I должен удовлетворять следующее условие ($D_{MIN_I} < I_{min} - 3\sigma_I$) и ($D_{MAX_I} > I_{max} + 3\sigma_I$), где σ_I – среднеквадратичная ошибка регистрации интенсивности.

Рассмотрим свойства самого фотошаблона. Предположим, что фотошаблон пропускает некоторую часть света. В таком случае диапазон регистрируемых значений интенсивности уменьшается. При этом среднеквадратичная ошибка регистрации интенсивности света остается неизменной, так как это характеристика системы, а не фотошаблона (в нашем случае 1). На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования при разных степенях пропускания фотошаблона: динамический диапазон $I_{max} - I_{min}$ принимает значения от 40 до 240 условных единиц с шагом 40, а расчетное значение среднеквадратичного отклонения σ_{sub} при этом снижается от 0,0092 до 0,0014. Зависимость носит гиперболический характер.

На рис. 4 представлены результаты расчета при разных степенях пропускания фотошаблона: динамический диапазон $I_{max} - I_{min}$, как и в случае имитационного моделирования, принимает значения от 40 до 240 условных единиц с шагом 40, а рассчитанное по формуле (3) значение среднеквадратичного отклонения σ_{sub} при этом снижается от $5,21 \cdot 10^{-4}$ до $0,87 \cdot 10^{-4}$. Зависимость носит гиперболический характер. Отметим, что значение среднеквадратичного отклонения уменьшилось на порядок при переходе к ПЗС-линейке в 12 разрядов.

Результаты расчетов говорят о том, что при регистрации на просвет слабоконтрастных фотошаблонов для снижения значения ошибки определения уровня освещенности целесообразнее применять ПЗС с большим количеством (12–16 и более) разрядов АЦП.

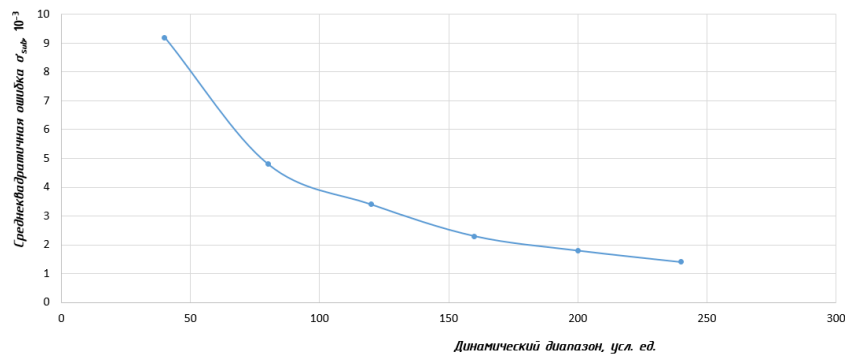


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичной ошибки от динамического диапазона по результатам имитационного моделирования для 8-битовой ПЗС-линейки
Fig. 3. The dependence of the mean square error on the dynamic range according to the results of simulation for an 8-bit CCD-line

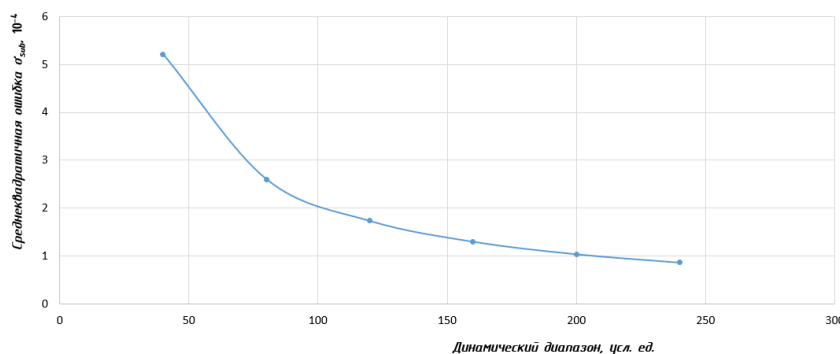


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной ошибки от динамического диапазона по результатам расчетов для 12-битовой ПЗС-линейки
Fig. 4. The dependence of the standard error on the dynamic range according to the results of calculations for a 12-bit CCD-line

Заключение

Сформулированы требования к уровню интенсивности света для обеспечения точности при субпиксельной регистрации элементов фотошаблона в идеальных условиях. Уровень интенсивности света I и диапазон чувствительности D_I системы регистрации должны удовлетворять следующее условие ($D_{MIN_I} < I_{\min} - 3\sigma_I$) и ($D_{MAX_I} > I_{\max} + 3\sigma_I$).

Показано, что при изменении динамического диапазона регистрации от 40 до 240 условных единиц и постоянной ошибке регистрации среднеквадратичная ошибка субпиксельных измерений изменяется от 0,0092 до 0,0014 по закону гиперболы. Следовательно, для слабоконтрастных фотошаблонов целесообразнее применять ПЗС с большим количеством (12 или 16) разрядов АЦП.

Список литературы / References

1. Lin Z., Shum H.Y. Fundamental limits of reconstruction-based superresolution algorithms under local translation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2004. № 26 (1). P. 83–97.
2. Farsiu S., Elad M., Milanfar P. Multiframe demosaicing and super-resolution of color images // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. № 15 (1). P. 141–159.
3. Evangelidis G.D., Psarakis E.Z. Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2008. № 30 (10). P. 1858–1865.
4. Baker S., Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. № 24 (9). P. 1167–1183.

5. Ben-Ezra M., Zomet A., Nayar S.K. Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005. № 27(6). P. 977–987.
6. Ben-Ezra M., Lin Z., Wilburn B., Zhang W. Penrose pixels for super-resolution // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2001. № 33(7). P. 1370–1383.
7. Sub-Pixel Layout for Super-Resolution with Images in the Octic Group / Boxin Shi [et al.] // ECCV. 2014. № 1. P. 250–264.
8. Real-Time Single Image and Video Super-Resolution Using an Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network / Wenzhe Shi [et al.] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 105–114.
9. Haralick R.M., Shapiro L.G. Computer and Robot Vision. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1992.

Сведения об авторах

Дедков А.И., начальник сектора программного обеспечения оптико-механического и контрольно-измерительного оборудования ОАО «КБТЭМ-ОМО».

Лапко А.В., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+375 29 376 25 19;
e-mail: alexander.lapko@tut.by
Лапко Александр Владимирович

Information about the authors

Dedkov A.I., head of optical-mechanical and inspection equipment software section of OJSC «KBTEM-OMO».

Lapko A.V., PG student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375 29 376 25 19;
e-mail: alexander.lapko@tut.by
Lapko Aleksandr Vladimirovich