

УДК 535.8, 681.7, 004.93'1, 004.932.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПРОДОЛЬНОЙ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ПО ЕДИНСТВЕННОЙ ФОТОГРАФИИ

М.А. Волкова^а, В.Р. Луцив^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: volkova@grv.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.01.16, принята к печати 24.02.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-251-257

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Волкова М.А., Луцив В.Р. Использование эффекта продольной хроматической aberrации для измерения расстояний по единственной фотографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 251–257. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-251-257

Аннотация

Предмет исследования. Предложен метод измерения расстояния до поверхностей сфотографированных объектов на основе использования эффекта продольной хроматической aberrации. В связи с этим фокусное расстояние линзы зависит от длины волны преломляемого света, поэтому степень расфокусировки сформированного линзой изображения определяется не только расстоянием плоскости изображения от линзы, но и тем, в каком цветовом диапазоне (красном, зеленом или синем) была сделана фотография. **Метод.** Предложенный метод измерения расстояния основывается на сопоставлении степени расфокусировки изображения для различающихся длин волн (например, красный и синий цвет). Сопоставление выполняется в области пространственных частот на основе анализа комплексных спектрограмм изображения (Фурье-спектра, локально рассчитываемого внутри окна, сканирующего изображение). С помощью локального анализа пространственного спектра расстояние до каждой точки сфотографированных поверхностей рассчитывается в аналитической форме, используемая при этом модель пятна рассеяния точки описывается функцией Гаусса. **Основные результаты.** Работоспособность метода измерения дальности частично подтверждена на основе имитации расфокусировки изображений перемещением объектива относительно световоспринимающей матрицы камеры. Представленный анализ хроматических свойств традиционно применяемых оптических материалов также подтверждает его физическую реализуемость. Предложена методика измерения дальности на основе реально различающейся степени дефокусировки изображений в разных цветовых каналах, использующая специальную калибровку применяемой электронно-оптической системы. **Практическая значимость.** Предложенный метод измерения дальности может быть полезен в ситуациях, исключающих возможность активной подсветки (облучения) фотографируемых объектов, и при создании дешевых и компактных оптических измерительных устройств, подобных Kinect for Xbox-360.

Ключевые слова: продольная хроматическая aberrация, измерение расстояния, комплексная спектрограмма, расфокусировка изображения, формула линзы, функция рассеяния точки, калибровка оптической системы

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и частично при государственной поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

APPLICATION OF THE LONGITUDINAL CHROMATIC ABERRATION EFFECT FOR DISTANCES MEASUREMENT ON THE BASIS OF A SINGLE PHOTO

M.A. Volkova^а, V.R. Lutsiv^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: volkova@grv.ifmo.ru

Article info

Received 18.01.16, accepted 24.02.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-251-257

Article in Russian

For citation: Volkova M.A., Lutsiv V.R. Application of the longitudinal chromatic aberration effect for distances measurement on the basis of a single photo. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 251–257. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2--251-257

Abstract

Subject of Research. We propose a method for measuring the distances to the surfaces of photographed objects based on the effect of longitudinal chromatic aberration. According to this effect, the focal length of lens depends on the wavelength of refracted light, thus the defocus of image formed by lens depends not only on the distance from image plane to lens, but also on the wavelength of light the picture was taken for (red, green or blue color ranges). **Method.** The proposed method of distance measurement is based on comparison of image defocus for different wavelengths (e.g., red and blue). The comparison is performed in the spatial frequency domain and is based on analysis of image complex spectrograms (the Fourier spectrum calculated locally within a window scanning the image). The distance to each point of photographed surface is calculated in closed form by the analysis of local spatial spectrum with the use of Gaussian model of point spread function. **Main Results.** The working capacity of distance measurement technique is partially verified on the basis of image defocus imitation by different displacement of objective lens with respect to sensor matrix of camera. The presented analysis of chromatic parameters of traditionally applied optical materials also proves the physical realizability of proposed technique. A technology is also proposed for distance measuring based on really differing image defocus in different color channels applying a special calibration of electro-optical system. **Practical Relevance.** The proposed distance measurement technique could be practically useful in the cases where any active illumination of objects being photographed is prohibited. It is also worth to be applied in the inexpensive low-sized optical measuring devices like Kinect for Xbox-360.

Keywords

longitudinal chromatic aberration, distance measurement, complex spectrogram, image defocus, lens formula, point spread function, optical system calibration

Acknowledgements

The work was supported by the Ministry of Education and Science, and partially by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01).

Введение

В последние десятилетия автоматический анализ изображений находит все более широкое применение. Этому способствуют появление на рынке недорогих высокопроизводительных вычислителей, создание общедоступных больших баз маркированных видеоданных (таких как MNIST или ImageNet [1]), широкое размещение в Интернете эффективных алгоритмов и программ автоматической классификации изображений. Использование информации о третьей пространственной координате расширяет круг задач, эффективно решаемых на основе автоматического анализа изображений. Дополнительные возможности возникают для распознавания формы объекта при его наблюдении с изменяющегося ракурса, для автоматической интерпретации трехмерных сцен, не говоря уже об измерении собственно расстояний при решении разнообразных задач исследовательской и практической направленности.

Существуют методы измерения расстояния, применяющие активное воздействие на измеряемые объекты. Среди них к категории оптических можно отнести, например, методы, основанные на структурированной подсветке, использовании лазерных локаторов, времяпролетных камер или стробированной лазерной подсветки. Однако иногда активное воздействие на объекты наблюдения и измерения оказывается нежелательным. Более того, в отличие от видеокамер, цена которых может составлять единицы долларов, устройства для активных измерений достаточно дороги и часто могут быть недоступны широкому пользователю. Таким образом, в определенных случаях «пассивные» способы измерения дальности могут быть предпочтительней. Наконец, иногда привлекательной может оказаться возможность выполнить измерения по уже сделанным фотографиям. Особый интерес представляют методы измерения, основанные на оптических эффектах, ранее для таких измерений не использовавшихся и даже считавшихся вредными и подлежащими устранению или хотя бы минимизации. К таким эффектам относится, например, расфокусировка деталей изображения или эффект продольной хроматической aberrации, которому и посвящена настоящая работа.

Приведенные ниже материалы организованы следующим образом. В первом разделе приводится краткий обзор известных оптических методов «пассивного» измерения дальности. Во втором разделе математически описан предлагаемый метод измерения расстояния на основе использования эффекта продольной хроматической aberrации, а в третьем разделе приведены результаты экспериментов, практически подтверждающих возможность применения рассмотренной математической модели для измерения абсолютных значений расстояния. В заключении резюмируются представленные в работе теоретические основы и перспективы практической реализации и использования предлагаемого метода измерения расстояния по единственному цветному изображению.

Методы измерения расстояния по изображениям

Многие методы автоматического анализа изображений позаимствованы в живых зрительных системах. К ним можно отнести и определение дальности на основе измерения стереодиспаратности. Вычисление расстояний до небесных тел на основе эффекта параллакса успешно применяется в астрономии уже давно. Однако проблемы надежного автоматического сопоставления на стереопарах локальных объектов, наблюдаемых с различающихся ракурсов, и построения плотных карт глубины и по сей день не до конца решены, неизменно включаются в новые учебники по компьютерному зрению и ежегодно обсуж-

даются во множестве научно-технических публикаций (см., например, [2, 3]). Источником существенных трудностей в этой области являются эффекты загороживания и необходимость иметь дело с изображениями гладких (лишенных отличительных деталей) поверхностей.

Идеи, сходные с идеями стереоанализа, положены также в основу методов определения «структуры из движения» (см., например, [2, 4]). В данном случае различающиеся ракурсы наблюдения получаются не с использованием нескольких видеокамер, а за счет перемещения объекта наблюдения в поле зрения единственной камеры. Траектории движения объектов могут в этом случае быть достаточно сложными, поэтому к трудностям, характерным для стереоанализа, добавляется еще и необходимость решения сложных уравнений.

В отличие от стереоанализа, методы оценки формы объектов на основе изменения наблюдаемой освещенности их поверхностей («форма из затенения») пригодны и для анализа изображений гладких поверхностей. Эти методы, вероятно, также заимствованы в живых зрительных системах. Первое подробное изложение этого метода измерения относят к работе Хорна [5], подробное описание метода можно также найти в монографии Марра [6]. Согласно этому методу оценка формы объекта (по изменению его наблюдаемой освещенности) основывается на интегрировании угла наклона поверхности по отношению к направлению на источник освещения и направлению на наблюдателя. Такие вычисления достаточно сложны, дают неопределенный результат в областях разрыва функции глубины (например, в областях загороживания) и основываются на использовании не всегда корректных допущений об отражающих свойствах анализируемых поверхностей.

Встречаются предположения, что метод «измерения глубины из фокусировки» также имеет аналогию в живых зрительных системах. Метод достаточно прост (на лимбе настройки резкости фотообъективов часто была нанесена шкала расстояний), однако, аналогично методам стереоизмерений, он теряет работоспособность при анализе изображений однородных поверхностей. В то же время оценка резкости (степени сфокусированности изображения) не может происходить на основе анализа единственного пиксела – вычисления (например, анализ пространственного спектра Фурье) выполняются внутри скользящего по изображению локального окна. В результате возникают эффекты локального пространственного усреднения выполненных измерений. Кроме того, для выполнения измерений требуется 10 и более (в зависимости от требуемой точности оценки глубины) по-разному сфокусированных снимков [4].

Напротив, для выполнения измерений методом «глубина из дефокусировки» требуется хотя бы два по-разному сфокусированных изображения. Этот подход впервые был предложен в 1987 г. Пентландом [7] и Гроссманом [8], а обширное исследование измерения глубины по нескольким дефокусированным изображениям было представлено в 1998 г. в монографии [4]. С тех пор ведутся активные исследования проблемы измерения глубины по степени локальной расфокусировки снимка. Теперь удастся измерить третью пространственную координату даже по единственному снимку, и делается это разнообразными способами. Например, может анализироваться расфокусировка резких перепадов яркости в найденных на изображении зонах границ [9] (при этом, однако, возникает проблема корректной экстраполяции измеренной глубины в остальные области снимка), или карта локальной дефокусировки может измеряться по контрасту спектра [10].

Нельзя не упомянуть принципиально другой современный подход к измерению дальности по единственному изображению. Это обучение специальных «преобразователей» показывать на выходе оценку расстояния в ответ на предъявляемые фрагменты изображения сцены. Основой такого преобразователя может, например, быть аппарат марковских случайных полей [11] или искусственные нейронные сети глубокого обучения [12]. Вне рамок настоящего обзора остаются многочисленные работы, в которых делается вывод об относительной дальности объектов в сцене на основе интерпретации ее содержания, поскольку семантический анализ – это предмет совсем другого исследования.

Наконец, обратимся собственно к предмету настоящей работы. В ней анализируется эффект продольной хроматической аберрации (хроматизм положения, см., например, [13]), компенсацией которого многие годы занимаются разработчики оптических приборов [14]. Оказалось, однако, что с использованием этого эффекта можно получать и полезные результаты. Например, коллективу лабораторий DxO в Болонье удалось с его помощью существенно увеличить глубину резкости фотографического объектива [15], и этот результат стал стимулом для исследования возможности применения эффекта продольной хроматической аберрации для измерения дальности, рассмотренного подробнее в следующем разделе.

Измерение расстояния на основе эффекта продольной хроматической аберрации

Рассмотрим схему формирования изображения, показанную на рисунке. Эта схема и выполненные с ее помощью геометрические расчеты в области пространственных координат, а также расчеты в области частот пространственного Фурье-спектра приводятся в виде, предложенном в монографии [4]. На рисунке использованы следующие обозначения: D – расстояние от линзы до отображаемой точки на поверхности объекта, F – фокусное расстояние линзы, z – расстояние от линзы до плоскости сфокусированного изображения, v – расстояние от линзы до плоскости реально сфокусированного (например, на фото-

пленке) расфокусированного изображения, r – реальная апертура линзы, r_{b_1} и r_{b_2} – проекции радиуса апертуры на плоскость реально сформированного расфокусированного изображения, ε и δ – вспомогательные переменные для обозначения радиуса апертуры линзы и его проекции на плоскость расфокусированного изображения.

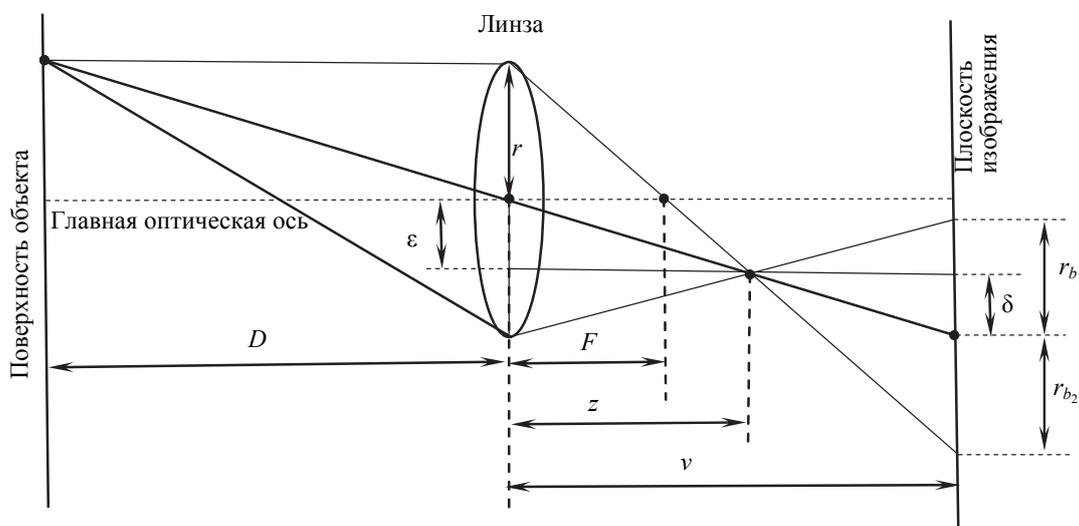


Рисунок. Схема формирования расфокусированного изображения

Анализируя подобные треугольники, можно составить следующие выражения:

$$\frac{r_{b_1} - \delta}{v - z} = \frac{r - \varepsilon}{z}, \quad \frac{r_{b_2} + \delta}{v - z} = \frac{r + \varepsilon}{z}, \quad \frac{\delta}{v - z} = \frac{\varepsilon}{z},$$

из которых путем несложных преобразований получается равенство (1):

$$r_{b_1} = r_{b_2} = r_b = r \left(\frac{v}{z} - 1 \right). \quad (1)$$

Подстановка в (1) выражения для $1/z$, полученного из формулы линзы (2), дает формулу (3) для вычисления радиуса пятна рассеяния:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{D} + \frac{1}{z}, \quad (2)$$

$$r_b = rv \left(\frac{1}{F} - \frac{1}{v} - \frac{1}{D} \right). \quad (3)$$

Предполагаем, что форма пятна рассеяния на плоскости изображения с абсциссами x и ординатами y соответствует нормальному закону распределения (4), что в большинстве случаев приблизительно выполняется для реальных объективов [4]. Тогда параметр размытия σ для m -го варианта расфокусировки изображения в соответствии с (3) выразится формулой (5), в которой ρ – это так называемое число камеры [4], связывающее выражения (3), (4) и (5) и подлежащее определению для конкретного объектива в процессе калибровки используемой в эксперименте оптической системы:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \frac{-(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_m = \rho r_m v_m \left(\frac{1}{F_m} - \frac{1}{v_m} - \frac{1}{D} \right). \quad (5)$$

Обратимся теперь к эффекту продольной хроматической aberrации. В соответствии с ним свет с разной длиной волны по-разному преломляется линзой, в результате чего ее фокусное расстояние F короче для синего, чем для красного цвета [13]. Разрешая выражение (5) относительно D для двух вариантов расфокусировки изображения ($m=1$ и $m=2$, например, для синего и красного цветов) и приравнивая полученные выражения, получим формулы (6)–(8) [4], связывающие значения параметров размытия для этих вариантов расфокусировки при неизменной геометрической конфигурации оптической системы ($v_1=v_2=v$, $r_1=r_2=r$ и $F_1 \neq F_2$):

$$\sigma_1 = \alpha \sigma_2 + \beta, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{r_1 v_1}{r_2 v_2} = 1, \quad (7)$$

$$\beta = \rho r v_1 \left(\frac{1}{F_1} - \frac{1}{v_1} - \frac{1}{F_2} + \frac{1}{v_2} \right) \xrightarrow{v_1=v_2=v} \rho r v \left(\frac{1}{F_1} - \frac{1}{F_2} \right). \quad (8)$$

Расфокусированное изображение $g_m(x,y)$ (для m -го варианта расфокусировки, где $m=1$ или $m=2$) можно представить как свертку (9) исходного (сфокусированного) изображения $b(x,y)$ с соответствующим вариантом функции рассеяния точки $h_m(x,y)$. Операция свертки обозначена в (9) символом (*).

$$g_m(x,y) = h_m(x,y) * b(x,y). \quad (9)$$

Результату $G_m(\omega_x, \omega_y)$ свертки (9) соответствует в области пространственных частот $\{\omega_x, \omega_y\}$ поэлементное перемножение (10) Фурье-спектров, $B(\omega_x, \omega_y)$ и $H_m(\omega_x, \omega_y)$ ее операндов:

$$G_m(\omega_x, \omega_y) = H_m(\omega_x, \omega_y) B(\omega_x, \omega_y). \quad (10)$$

Функция рассеяния точки (4) экспоненциального вида также имеет Фурье-спектр, имеющий форму экспоненты, поэтому результат деления друг на друга спектров (10) двух по-разному расфокусированных изображений описывается выражением (11):

$$\frac{G_1(\omega_x, \omega_y)}{G_2(\omega_x, \omega_y)} = \exp \left[-\frac{1}{2} (\omega_x^2 + \omega_y^2) (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) \right]. \quad (11)$$

Логарифмирование выражения (11) дает

$$\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = \frac{-2}{\omega_x^2 + \omega_y^2} \ln \frac{G_1(\omega_x, \omega_y)}{G_2(\omega_x, \omega_y)}. \quad (12)$$

Разность квадратов параметров размытия вычисляется в (12) для конкретных номеров гармоник двумерного пространственного спектра изображения. Чтобы сделать результат вычисления более робастным, усредним его по некоторому выбранному региону R площадью A в двумерной области пространственных частот:

$$\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = \frac{1}{A} \iint_R \frac{-2}{\omega_x^2 + \omega_y^2} \ln \frac{G_1(\omega_x, \omega_y)}{G_2(\omega_x, \omega_y)} d\omega_x d\omega_y = C. \quad (13)$$

Согласно (6), (7) и (13),

$$\sigma_1^2 - \sigma_2^2 = \alpha^2 \sigma_2^2 + 2\alpha\sigma_2\beta + \beta^2 - \sigma_2^2 = 2\sigma_2\beta + \beta^2 = C,$$

откуда

$$\sigma_2 = \frac{C - \beta^2}{2\beta}. \quad (14)$$

Подстановка (14) в (5) для $m=2$ и разрешение полученного результата относительно D дают

$$D = \frac{\rho r F_2 v}{\rho r v - \rho r F_2 - F_2 \sigma_2}.$$

Таким образом, на основе анализа пространственного спектра изображений, сформированных одним и тем же объективом для двух различающихся длин волн, удастся измерить расстояния D до представленных на этих изображениях точек поверхности сфотографированного объекта.

Естественно, рассчитывая расстояния до конкретной точки сфотографированной поверхности, необходимо анализировать пространственный спектр (так называемую комплексную спектрограмму) в локальной окрестности этой точки (в локальном окне, скользящем по изображению). Необходимо также упомянуть, что величина продольной хроматической аберрации может меняться от центра изображения (там, где его пересекает главная оптическая ось объектива) к периферии, однако обычно этим эффектом можно пренебречь¹. Есть также мнение [16], что, в отличие от окуляров для объективов (особенно для объективов, симметричных относительно плоскости диафрагмы), можно пренебречь и эффектом поперечной хроматической аберрации, который особенно заметен для световых пучков, входящих в объектив под существенным углом к главной оси. Однако, согласно этому эффекту (вследствие того, что фокусное расстояние линзы различается для различных длин волн), картинки различающегося цвета будут иметь различающийся размер на плоскости изображения. Как показывают наш опыт, это необходимо учитывать при совместном анализе локальных пространственных спектров по-разному расфокусированных изображений, поэтому мы еще вернемся к этой проблеме в следующем разделе.

Результаты экспериментов

В предыдущем разделе была предложена математическая модель расчета расстояния до точек поверхностей в трехмерной сцене по ее единственной цветной фотографии на основе эффекта продольной

¹ <http://www.handprint.com/ASTRO/ae4.html#chromatic> (28.12.2015)

хроматической aberrации. Мы также выполнили предварительные эксперименты по проверке работоспособности предложенной математической модели.

Сначала были измерены расстояния по паре дефокусированных панхроматических снимков с использованием анализа комплексных спектрограмм, описанного в предыдущем разделе. Фокусные расстояния линзы F_1 и F_2 для неразличающихся длин волн, расстояние v от линзы до плоскости изображения, радиус r апертуры объектива и его параметр ρ были количественно определены для выбранной в эксперименте камеры Sony DFW-VL-500 путем выполнения для нее процедуры калибровки. Для формирования исследованной пары изображений были использованы $v_1=28,28$ мм, $v_2=28,21$ мм и $F=\text{const}=27,27$ мм. Расстояния v регулировались перемещением объектива относительно плоскости изображения. При этом разность $\Delta_v = (1/v_2 - 1/v_1)$ в левой части формулы (8) составила приблизительно $8,525 \cdot 10^{-5}$. Таким способом мы предварительно промоделировали взаимную дефокусировку исследуемых изображений. Эта имитация математически корректна, поскольку в формуле (8) $\Delta_v = (1/v_2 - 1/v_1)$ при $F=\text{const}$ математически идентично $\Delta_F = (1/F_1 - 1/F_2)$ при $v=\text{const}$. Измеренные расстояния соответствовали реально использованным в эксперименте. Среднеквадратическая величина случайной (шумовой) составляющей результатов измерения расстояния составила около 0,5% при подсчете комплексных спектрограмм в окне размером 64×64 пиксела, что подтверждает работоспособность предложенного математического метода.

Затем была численно оценена работоспособность модели при регулировании степени дефокусировки не изменением расстояния v , а изменением фокусного расстояния линзы F . Была рассмотрена абстрактная линза с некомпенсированной сильной хроматической aberrацией, изготовленная из материала BK7 (borosilicate crown). У такой линзы при $F=1000$ мм для длин волн 486,1 нм (синий) и 656,3 нм (красный) разброс F составит около 15 мм^1 , т.е. 1,5%. Для измеренного при калибровке фокусного расстояния $F=27,27$ мм соответствующий разброс, вызванный хроматической aberrацией, составил бы 0,41 мм. Подставляя это значение в формулу (8), получаем $\Delta_F = (1/F_1 - 1/F_2) = 5,423 \cdot 10^{-4}$, что более чем в 6 раз превышает рассчитанное ранее значение Δ_v . Можно, конечно, сделать поправку на возможную частичную компенсацию хроматизма положения в реальных современных объективах, однако выполненный расчет показывает, что эффект хроматизма может при вычислении взаимной дефокусировки изображений оказывать действие, сопоставимое с эффектом геометрической перестройки оптической системы. Таким образом, результат измерения расстояния методом, предложенным нами, не «утонет в шуме». Это подтверждается также представленными в [15] экспериментами, описывающими оценку относительного удаления объектов по различающейся дефокусировке их изображений в разных цветовых каналах. Планируемая нами серия экспериментов по калибровке хроматических параметров реальной камеры (разброса значений фокусного расстояния под действием хроматической aberrации) должна окончательно подтвердить работоспособность предлагаемого метода измерения дальности.

Заключение

Теоретически обоснована возможность измерения расстояний до объектов, представленных на единственном цветном фотоснимке. Особенностью предложенного метода является то, что основой измерения является эффект продольной хроматической aberrации, с которым разработчики объективов обычно борются, создавая в результате сложные и дорогие оптические системы, а для практической реализации предлагаемого нами метода как раз требуются простые оптические системы с максимально выраженным хроматизмом положения. В отличие от работы [15], мы показали, как на основе эффекта хроматизма можно не только оценивать относительные удаленности объектов, но и выполнять реальное измерение абсолютных значений расстояния. Результаты планируемых экспериментов по практическому воплощению предложенных теоретических построений в реальных системах с достаточно сильно выраженным хроматизмом мы собираемся представить в последующих публикациях. Предложенный метод измерения дальности может быть полезен в ситуациях, исключающих возможность активной подсветки (облучения) фотографируемых объектов, а также при создании дешевых и компактных оптических измерительных устройств, подобных Kinect for Xbox-360.

Литература

1. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2012. V. 2. P. 1097–1105.
2. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Washington: Springer, 2011. 812 p. doi: 10.1007/978-1-84882-935-0
3. Kamencay P., Breznán M., Jarina R., Lukac P., Zachariasova M. Improved depth map estimation from stereo images based on hybrid method // Radioengineering. 2012. V. 21. N 1. P. 79–85.
4. Chaudhuri S., Rajagopalan A.N. Depth from Defocus: A Real Aperture Imaging Approach. Springer, 1999. 172 p. doi: 10.1007/978-1-4612-1490-8

¹ <http://www.telescope-optics.net/chromatic.htm#angle>

5. Horn B.K.P. Obtaining shape from shading information / In: The Psychology of Computer Vision (P.H. Winston, Ed.). McGraw-Hill, 1975.
6. Marr, D. Vision. A Computer Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information. NY: W.H. Freeman and Company, 1982. 415 p.
7. Pentland A. A new sense for depth of field // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1987. V. PAMI-9. N 4. P. 523–531. doi: 10.1109/TPAMI.1987.4767940
8. Grossmann P. Depth from focus // Pattern Recognition Letters. 1987. V. 5. N 1. P. 63–69. doi: 10.1016/0167-8655(87)90026-2
9. Zhuo S., Sim T. On the recovery of depth from a single defocused image // Lecture Notes in Computer Science. 2009. V. 5702. P. 889–897. doi: 10.1007/978-3-642-03767-2_108
10. Tang C., Hou C., Song Z. Defocus map estimation from a single image via spectrum contrast // Optics Letters. 2013. V. 38. N 10. P. 1706–1708. doi: 10.1364/OL.38.001706
11. Saxena A., Chung S.H., Ng A.Y. 3-D depth reconstruction from a single still image // International Journal of Computer Vision. 2008. V. 76. N 1. P. 53–69. doi: 10.1007/s11263-007-0071-y
12. Eigen D., Puhrsch C., Fergus R. Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network // Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2014). Montreal, Canada, 2014. P. 2366–2374.
13. Бегунов Б.Н., Заказнов Н.П. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973. 488 с.
14. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966. 565 с.
15. Tisse C.-L., Nguyen H. P., Tessieres R., Ryanet M., Guichard F. Extended depth-of-field using sharpness transport across color channels // Proc. SPIE. 2008. V. 7061. Art. 706105. doi: 10.1117/12.793826
16. Walker B. Optical Engineering Fundamentals. 2nd ed. Bellingham, WA: SPIE Press, 2008. 277 p.

- Волкова Мария Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, volkova@grv.ifmo.ru
- Луцив Вадим Ростиславович** – доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vluciv@mail.ru
- Maria A. Volkova** – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, volkova@grv.ifmo.ru
- Vadim R. Lutsiv** – D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vluciv@mail.ru