
ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

OPTICAL DATA PROCESSING

УДК 621.375.826

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРА ОКНА СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДАЛЬНОСТИ ПО ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В. Л. КОЗЛОВ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Приводятся результаты исследований, связанных с использованием фильтров выделения контрастных переходов и анализом влияния размера окна сканирования на точность построения карты глубины по стереоизображениям. Описаны эффекты применения различных методик субпиксельной интерполяции для повышения точности измерения расстояний. Разработана методика автоматического задания размеров окна сканирования при измерении дальности по цифровым изображениям, заключающаяся в вычислении дискретных градиентов изображения объекта с использованием фильтров выделения контрастных границ и в последующем формировании размера окна сканирования на основании анализа контрастных переходов и обеспечивающая повышение достоверности измерений и ускорение обработки контрастных участков изображения. Проведен анализ точности определения положения экстремума корреляционной функции в субпиксельном диапазоне для методик на основе алгоритмов центра масс, параболического и гауссова. Предложена методика повышения точности определения положения экстремума, обеспечивающая неопределенность измерений в сотые доли пикселя.

Ключевые слова: цифровое изображение; стереоизображение; окно сканирования; измерение расстояний; карта глубины.

Образец цитирования:

Козлов В. Л. Оптимизация размера окна сканирования для измерений дальности по цифровым изображениям // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 2. С. 133–140.

For citation:

Kozlov V. L. Optimizing the scanning window size for the distance measuring from digital images. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 2. P. 133–140 (in Russ.).

Автор:

Владимир Леонидович Козлов – доктор технических наук, доцент; профессор кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Author:

Vladimir L. Kozlov, doctor of science (engineering), docent; professor at the department of quantum radiophysics and optoelectronics, faculty of radiophysics and computer technologies. kozlovvl@bsu.by

OPTIMIZING THE SCANNING WINDOW SIZE FOR THE DISTANCE MEASURING FROM DIGITAL IMAGES

V. L. KOZLOV^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

The solution of the increasing accuracy task of restoring a three-dimensional space picture based on two-dimensional digital images requires the use of new effective techniques and algorithms for processing and analyzing digital images. The technique for automatically setting the scanning window sizes for digital range measurement is developed, which consists in calculating the discrete image gradients of an object using contrast boundary detection filters and then forming the scanning window size based on the analysis of contrast transitions. This increases the measurement reliability and accelerates the processing of the image contrast areas. An analysis of the determining accuracy of the correlation function extremum position in the subpixel range for techniques based on the center-of-mass, parabolic, and Gaussian algorithms is carried out. The technique for accuracy increasing of the extremum position determining is developed. The technique ensures measurement uncertainty in hundredths of a pixel.

Key words: digital image; stereo image; scanning window; measurement of distances; depth map.

Задача повышения точности восстановления трехмерной картины пространства по двумерным цифровым изображениям является актуальной, ее решение требует использования новых, эффективных методик и алгоритмов обработки анализа цифровых изображений. Значительный прогресс в этой области обусловлен, во-первых, развитием методов проективной геометрии применительно к области компьютерного зрения [1] и, во-вторых, перспективными достижениями в области детектирования характеристических точек на изображениях и их сопоставлением между изображениями [2].

Для снижения временных затрат на обработку стереоизображений и повышения качества построения карт глубины активно разрабатываются инструменты, автоматизирующие этот процесс. Задача точного восстановления карты глубины по видео без дополнительной информации является в общем случае неразрешимой, поэтому для автоматического построения применяются подходы, основанные на минимизации локальных критериев. К ним относятся методы обработки карт глубины, использующие данные о цвете и движении из исходной видеопоследовательности для повышения стабильности карт глубины по времени и исправления ошибок построения. Фильтрация производится с учетом сходства пикселей исходного видео по яркости (цвету) и их пространственной близости [3]. В работе [4] предложен скоростной метод вычисления карты глубины (изображения, каждый пиксель которого содержит информацию о расстоянии до стереокамеры) для реализации на графическом процессоре. Данное решение базируется на использовании нескольких скользящих окон адаптивной структуры с пред- и постобработкой входных и выходных изображений. Высокая производительность достигается за счет архитектуры современных графических процессоров, наиболее подходящих для решения задачи вычисления карты глубины локальными методами [4].

Принцип измерения расстояний по стереоизображению основан на определении разности координат одного и того же объекта на двух цифровых изображениях. Это выполняется по следующему алгоритму. На первом изображении формируется окно сканирования с изображением объекта. Оно автоматически с такими же координатами формируется и на втором снимке. Затем осуществляется сканирование одного окна относительно другого по горизонтали и вертикали, при этом вычисляется значение двумерной нормированной корреляционной функции (англ. normalized cross correlation, NCC) [5] между выделенными изображениями в соответствии с выражениями:

$$R(\Delta u, \Delta v) = \frac{\sum_{x, y}^{x + \Delta x, y + \Delta y} (I_1(x, y) - \bar{I}_1)(I_2(x + \Delta u, y + \Delta v) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{x, y}^{x + \Delta x, y + \Delta y} (I_1(x, y) - \bar{I}_1)^2 \sum_{x, y}^{x + \Delta x, y + \Delta y} (I_2(x + \Delta u, y + \Delta v) - \bar{I}_2)^2}}, \quad \bar{I}_n = \frac{\sum_{x, y}^{x + \Delta x, y + \Delta y} I_n(x, y)}{\Delta x \cdot \Delta y},$$

где I_1 – сигнал окна сканирования первого изображения; I_2 – сигнал окна сканирования второго изображения; $\Delta x, \Delta y$ – размер сканирующего окна по горизонтали и вертикали соответственно; $n = 1, 2$; $\Delta u, \Delta v$ – смещение одного окна сканирования относительно другого по горизонтали и вертикали соответственно.

Однако в литературных источниках отсутствуют сведения об исследованиях, связанных с анализом влияния размера окна сканирования на точность измерения расстояний и достоверность построения карты глубины по стереоизображениям, и об использовании фильтров выделения контрастных переходов для оптимизации размера окна сканирования.

Для нахождения разности координат объекта в плоскостях изображений стереопары на первом изображении задается окно сканирования, содержащее участок исследуемого объекта. Время работы алгоритма измерений и его точность будут различны для разных размеров окон сканирования. В целях повышения достоверности измерений и выбора оптимального размера окна был проведен анализ ошибочных измерений дальности при построении карт глубины, полученных с помощью обработки изображений стереопары функцией NCC с различными размерами окон сканирования. Эталонная карта глубины и карты глубины, полученные в результате обработки изображений алгоритмом NCC с окнами сканирования разных размеров, представлены на рис. 1.

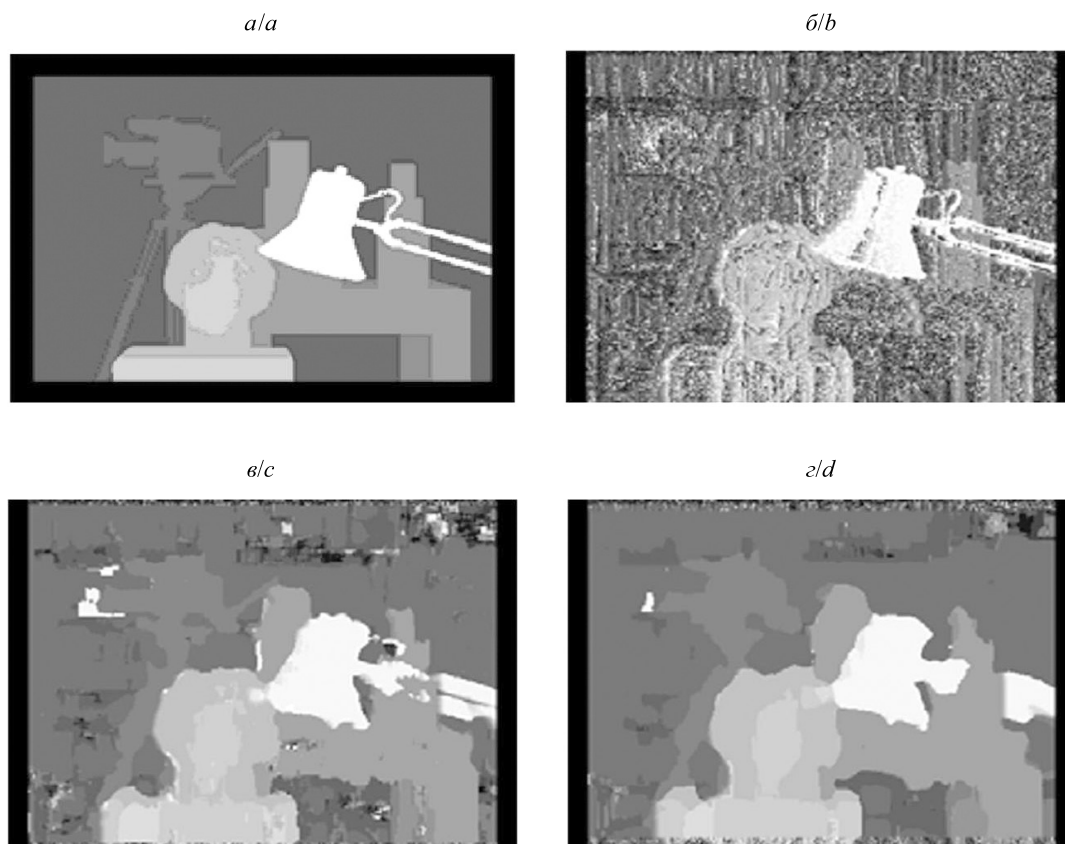


Рис. 1. Карты глубины: эталонная (а) и полученные в результате обработки алгоритмом NCC с окнами сканирования 3×3 пк (б), 9×9 пк (в), 17×17 пк (г)

Fig. 1. Depth maps: the reference (a) and the resulting NCC algorithm with scanning windows 3×3 pixels (b), 9×9 pixels (c), 17×17 pixels (d)

При малом размере окна сканирования, как видно из рис. 1, карта глубины содержит множество мелких артефактов, а при увеличении размера окна появляются искажения в окрестности границ объектов. Для количественной оценки влияния искажения границ при больших размерах окон сканирования на эффективность построения карты глубины были определены точки ошибочного восстановления дальности, расположенные вблизи границ объектов. Результаты анализа представлены на рис. 2. Графики зависимости общего количества несоответствий между экспериментально полученной картой глубины и эталонной и количества несоответствий вблизи границ объектов в зависимости от размера окна сканирования представлены на рис. 3.

Как видно из графика (рис. 3), увеличение размера окна приводит к снижению общего числа ошибок, но одновременно и к увеличению ошибочных измерений вблизи границ объектов. Для увеличения числа корректных обнаружений, а следовательно, повышения достоверности измерений разработана методика автоматического определения размеров окна сканирования, использующая вычисление градиентов на изображении для выделения контрастных переходов [6].



Рис. 2. Ошибочные точки возле границ объектов при размере окна сканирования 3×3 пк (а), 17×17 пк (б)

Fig. 2. Erroneous points near the boundaries of objects with scanning window size of 3×3 pixels (a), 17×17 pixels (b)

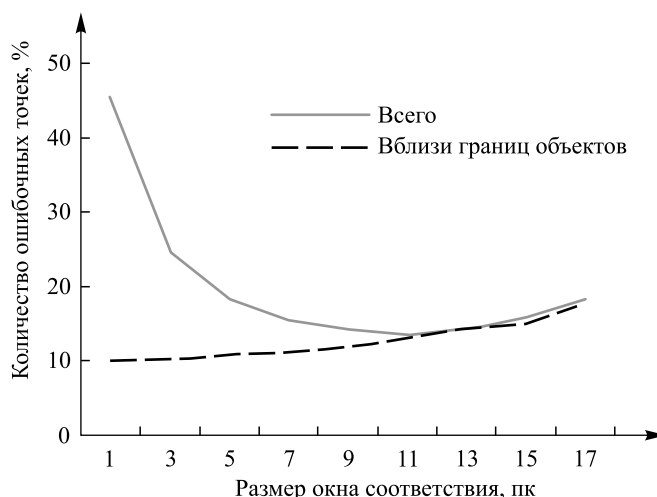


Рис. 3. Зависимость числа ошибок от размера окна сканирования

Fig. 3. Dependence of the number of errors on the scanning window size

Для вычисления дискретных градиентов целесообразно использование операторов Робертса, Превитта и Собела, основанных на свертке изображения с целочисленными фильтрами. Величина отклика операторов вычисляется по формуле

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2},$$

где G_x , G_y – результаты свертки изображения с соответствующими фильтрами операторов. Маски фильтров и результаты их экспериментального использования представлены на рис. 4.

Оператор Робертса имеет маску фильтра размером 2×2 пк, что позволяет рассчитывать его быстрее, чем с помощью операторов Превитта и Собела. У оператора Собела влияние шума угловых элементов меньше, чем у оператора Превитта. У каждой из масок сумма коэффициентов равна нулю, т. е. эти операторы будут давать нулевой отклик на областях постоянной яркости [7]. В результате экспериментального исследования работы фильтров (примеры представлены на рис. 4) показано, что для использования в процедуре автоматического определения размеров окна сканирования целесообразно применять фильтр Собела, поскольку он обладает наибольшей чувствительностью.

Разработанная методика автоматического задания размеров окна сканирования с использованием фильтров выделения контрастных границ объектов для измерения дальности по цифровым изображениям состоит в следующем. В точках, близких к измеряемому объекту, вычисляется градиент яркости изображения, и размер окна сканирования итеративно наращивается до тех пор, пока окно не будет включать в себя достаточно контрастных переходов. Для калибровки параметров методики, определения максимального и минимального размеров окна сканирования, а также порогового значения S были проведены экспериментальные исследования. При получении карт глубины для серии из 18 стереопар

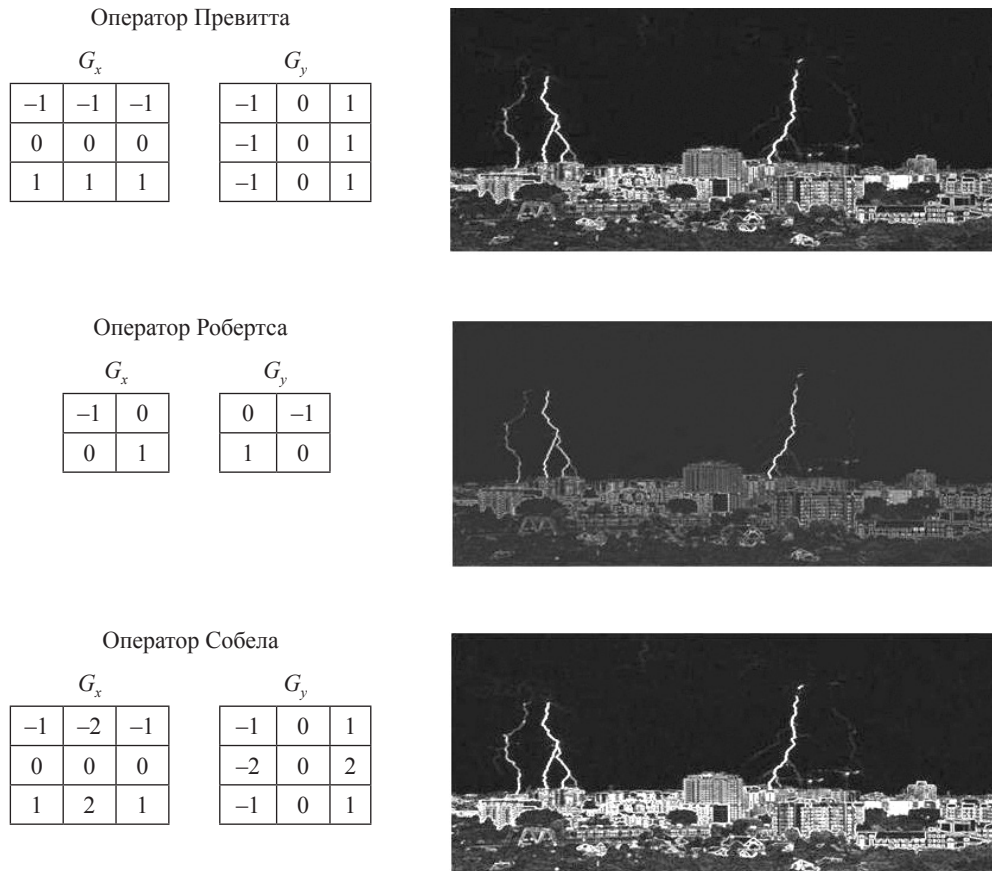


Рис. 4. Маски операторов выделения границ и примеры их работы
Fig. 4. Masks of border allocation operators and an examples of their operation

с известной эталонной картой глубины [8] размер окна, определяющего область поиска соответствий, варьировался в диапазоне от 1 до 17 пк. Критерием в экспериментальных данных выступает доля значений рассчитанной карты глубины, которые отличаются от эталона.

В качестве минимального и максимального размеров окон сканирования для дальнейшего использования в измерителе расстояний были выбраны величины 5×5 и 15×15 пк соответственно. При условии некорректного выбора пороговой величины для фильтра Собела такие ограничения позволяют сократить число ошибок в случаях как слишком большого порога, так и слишком малого. В качестве порогового значения для фильтра Собела была принята величина $S = 3,3$ (яркость изображения равна нулю для черного цвета и единице – для белого).

Экспериментальные результаты показали, что данная методика выбора размера окна сканирования позволяет снизить время обработки контрастных участков, а для менее контрастных областей, не содержащих резких перепадов яркости, не снижает точности работы корреляционной методики.

Для определения расстояния до объекта необходимо измерить разность координат объекта (диспаратет) в плоскостях первого и второго изображений стереопары. Это осуществляется с помощью автоматического сканирования одного изображения относительно другого по экстремальному значению корреляционной функции, которое обеспечивает измерение сдвига между изображениями с разрешением 1 пк [9]. Для повышения точности измерений необходимо определять положения экстремума корреляционной функции в пределах 1 пк с использованием субпиксельной обработки цифрового изображения. В [10] предлагаются три алгоритма субпиксельной интерполяции: центра масс, параболический и гауссов. Для их реализации необходимо определить три измеренных значения корреляционной функции R_0 , R_{-1} и R_{+1} , где R_0 – экстремальное значение функции; R_{-1} , R_{+1} – значения функции в точках, ближайших к экстремальному. Выражения, которые реализуют алгоритмы нахождения положения экстремума функций, используемых для корреляционной обработки изображений в субпиксельном диапазоне, имеют следующий вид:

$$\Delta x_{\text{Center of mass}} = \frac{R_{+1} - R_{-1}}{R_{-1} + R_0 + R_{+1}},$$

$$\Delta x_{\text{Parabolic}} = \frac{R_{-1} - R_{+1}}{2(R_{-1} - 2R_0 + R_{+1})},$$

$$\Delta x_{\text{Gaussian}} = \frac{\ln R_{-1} - \ln R_{+1}}{2(\ln R_{-1} - 2\ln R_0 + \ln R_{+1})}.$$

Для анализа точности субпиксельной обработки представленных алгоритмов определения экстремума для функций NCC и NSSD (нормированная сумма квадратов разностей; англ. normalized sum of squared differencies [5]) разработана следующая методика. Были взяты тестовые стереоизображения одних и тех же объектов, различающиеся по размерам снимков. По каждому объекту на стереоизображении был получен набор NCC- и NSSD-функций высокого разрешения, основное отличие которых состоит в том, что в точке максимального соответствия фрагментов изображений значение функции NCC будет иметь максимум, а значение функции NSSD – минимум. Очевидно, что в зависимости от размера окна сканирования и типа объекта на изображении кривизна рассматриваемых функций будет различаться.

Из полученных функций методом прореживания были сформированы наборы тестовых данных. Для функции NCC выбирались 3 точки x_m , $x_{m+\Delta}$ и $x_{m-\Delta}$ – со значениями функции $R(x_m)$, $R(x_{m+\Delta})$ и $R(x_{m-\Delta})$ соответственно. При этом точка x_m не обязательно попадает в абсолютный максимум функции, но выполняется $R(x_m) > R(x_{m+\Delta})$ и $R(x_m) > R(x_{m-\Delta})$. Все тройки точек, относящиеся к одному графику функции, представляют собой одну выборку. Для функции NSSD производились аналогичные операции вблизи минимума с условиями $R(x_m) < R(x_{m+\Delta})$ и $R(x_m) < R(x_{m-\Delta})$. Тестовые данные для всех объектов на изображениях обрабатывались в соответствии с алгоритмами центра масс, параболическим и гауссовым. Полученные результаты анализа для функции NCC представлены в табл. 1, для функции NSSD – в табл. 2. Вычисленные величины отклонений субпиксельной интерполяции даны в пикселях.

Таблица 1

**Результаты анализа неопределенности
субпиксельной интерполяции для функции NCC**

Table 1

Results of uncertainty analysis of subpixel interpolation for the NCC function

Позиция теста	Алгоритм интерполяции, пк		
	Центр масс	Параболический	Гауссов
Среднее отклонение по модулю	0,224 533	0,056 691	0,056 772
Дисперсия	0,011 721	0,000 257	0,000 186
Максимальное отклонение по модулю по всему полю данных	0,561 597	0,215 587	0,215 837

Таблица 2

**Результаты анализа неопределенности
субпиксельной интерполяции для функции NSSD**

Table 2

Results of uncertainty analysis of subpixel interpolation for the NSSD function

Позиция теста	Алгоритм интерполяции, пк		
	Центр масс	Параболический	Гауссов
Среднее отклонение по модулю	0,615 477	0,054 405	0,113 914
Дисперсия	0,120 106	0,000 257	0,005 232
Максимальное отклонение по модулю по всему полю данных	1,233 278	0,215 587	0,275 442

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшую неопределенность оценки положения экстремума как для функции NCC, так и для NSSD имеет алгоритм центра масс. Параболический метод и метод Гаусса дают приблизительно одинаковые результаты для функции NCC. При определении положения минимума функции NSSD наименьшую неопределенность оценки положения экстремума показал параболический метод. Также необходимо отметить, что вычислительные затраты на реализацию параболического метода меньше, чем метода Гаусса.

В результате проведенного анализа получено, что параболический метод оценки положения экстремума корреляционной функции обладает минимальной неопределенностью и является наиболее универсальным, так как позволяет одинаково хорошо определять положения как максимума, так и минимума функций, реализующих корреляционную обработку. Установлено, что средняя относительная неопределенность оценки положения экстремума для параболического метода не превышает 6 %.

Для повышения точности измерений с использованием субпиксельной обработки была разработана следующая методика. В окрестности точки экстремума корреляционной функции, полученного на этапе грубой оценки с точностью до 1 пк, с помощью билинейной интерполяции строится сетка ячеек, соответствующих узлам интерполяции интенсивности с шагом $h = \frac{1}{k}$ пк, где k – целое число, определяющее количество узлов сетки интерполяции ($k = 5 \dots 20$). Интенсивность $I(x + ih, y + jh)$ узла сетки вычисляется из выражения [11]

$$I(x + ih, y + jh) = (1 - ih)(1 - jh) \cdot I(x, y) + (1 - jh)ih \cdot I(x + 1, y) + \\ + (1 - ih)jh \cdot I(x, y + 1) + ijh^2 \cdot I(x + 1, y + 1),$$

где i, j – горизонтальный и вертикальный индексы узла соответственно; $I(x, y)$ – интенсивность пикселей изображения. Затем осуществляется повторное сканирование и в результате вычисляются значения корреляционной функции для k^2 узлов сетки. После этого для уточнения положения максимума корреляционной функции в субпиксельном диапазоне целесообразно использовать параболическую интерполяцию корреляционной функции вблизи найденного экстремума. Билинейная интерполяция интенсивности дает разрешение в пределах 1 пк, равное $\frac{1}{k}$, а параболическая интерполяция имеет среднюю относительную неопределенность 6 %. Использование такой последовательности действий позволяет при определении сдвига достичь разрешения в сотые доли пикселя при $k = 5 \dots 10$.

В отличие от известных [10; 11] в предлагаемой методике субпиксельной обработки в области максимума корреляционной функции осуществляется билинейная интерполяция интенсивности (а не значения корреляционной функции), и после этого выполняется повторное сканирование и вычисление значений корреляционной функции для всех узлов области интерполяции. Затем проводится параболическая интерполяция корреляционной функции вблизи найденного максимума. Это позволяет повысить точность субпиксельной обработки по сравнению с [10; 11]. Кроме того, в разработанной методике выполняется двумерная субпиксельная интерполяция, что обеспечивает дополнительное повышение точности измерения расстояний.

Библиографические ссылки

1. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2004.
2. Tuytelaars T., Mikolajczyk K. Local invariant feature detectors: a survey // Found. and trends in comput. graph. and vision. 2008. Vol. 3, issue 3. P. 177–280. DOI: 10.1561/06000000017.
3. Simonyan K., Grishin S., Vatolin D. Confidence measure for block-based motion vector field // Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2008) : proc. of XVIII Int. conf. (Moscow, 23–27 June, 2008). Moscow, 2008. P. 110–113.
4. Котюжанский Л. А. Вычисление карты глубины стереоизображения на графическом процессоре в реальном времени // Фундам. исслед. : в 2 ч. 2012. № 6, ч. 2. С. 444–449.
5. Brown M. Z., Burschka D., Hager G. D. Advances in computational stereo // IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell. 2003. Vol. 25, issue 8. P. 993–1008. DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1217603.
6. Козлов В. Л., Васильчук А. С. Оптимизация размера окна сканирования с помощью фильтра Собела в дальномере на цифровой фотокамере // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 9–13 нояб. 2015 г.). Минск, 2015. С. 213.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005.
8. Middlebury stereo datasets. URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data> (date of access: 14.09.2013).
9. Способ измерения расстояний на цифровой фотокамере : пат. 2485443 Рос. Федерации, МКИ G 01 С 3/00 / В. Л. Козлов ; заявитель Белорус. гос. ун-т. № 2011151194/28 ; заявл. 14.12.11 ; опубл. 20.06.13 // Бюллетень. 2013. № 17.
10. Tropea C., Yarin A. L., Foss J. F. Springer handbook of experimental fluid mechanics. Springer, 2007.
11. Козлов В. Л., Васильчук А. С. Субпиксельная обработка изображений для измерения дальности на основе цифровой фотокамеры // Приборы и методы измерений. 2012. № 1 (4). С. 115–120.

References

1. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2004.
2. Tuytelaars T., Mikolajczyk K. Local invariant feature detectors: a survey. *Found. and trends in comput. graph. and vision*. 2008. Vol. 3, issue 3. P. 177–280. DOI: 10.1561/06000000017.
3. Simonyan K., Grishin S., Vatolin D. Confidence measure for block-based motion vector field. *Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2008)* : proc. of XVIII Int. conf. (Moscow, 23–27 June, 2008). Moscow, 2008. P. 110–113.
4. Kotyuzhansky L. A. Calculation of the stereoimage depth card on the graphic processor in real time. *Fundam. res.* : in 2 parts. 2012. No. 6, part 2. P. 444–449 (in Russ.).
5. Brown M. Z., Burschka D., Hager G. D. Advances in computational stereo. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Mach. Intell.* 2003. Vol. 25, issue 8. P. 993–1008. DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1217603.
6. Kozlov V. L., Vasilchuk A. S. [Optimizing the size of the scanning window using the Sobel filter in the range finder on a digital camera]. *Kvantovaya elektronika* : mater. X Int. sci.-tech. conf. (Minsk, 9–13 Novemb., 2015). Minsk, 2015. P. 213 (in Russ.).
7. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. Moscow : Tekhnosfera, 2005 (in Russ.).
8. Middlebury stereo datasets. URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data> (date of access: 14.09.2013).
9. Sposob izmereniya rasstoyanii na tsifrovoy fotokamere [Method for measuring distances on a digital camera] : pat. 2485443 Russ. Fed., MKI G 01 C 3/00 / V. L. Kozlov ; declarer Belarus. State Univ. No. 2011151194/28 ; declar. 14.12.11 ; publ. 20.06.13. *Bul.* 2013. No. 17 (in Russ.).
10. Tropea C., Yarin A. L., Foss J. F. Springer handbook of experimental fluid mechanics. Springer, 2007.
11. Kozlov V. L., Vasilchuk A. S. [Subpixel image processing for distance measurement based on a digital camera]. *Prib. i metody izmer.* 2012. No. 1 (4). P. 115–120 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.03.2018.
Received by editorial board 23.03.2018.