

УДК 004.021

МЕТОД СОЗДАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ПАНОРАМ ИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВСЕНАПРАВЛЕННЫМИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ

В.П. Лазаренко^{a,b}, Т.С. Джамийков^c, В.В. Коротаев^a, С.Н. Ярышев^a

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ООО «ЭВС», Санкт-Петербург, 195253, Российская Федерация

^c Технический Университет, София, 1000, Болгария

Адрес для переписки: saiberbest@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.07.15, принята к печати 17.11.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-46-53

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Лазаренко В.П., Джамийков Т.С., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Метод создания сферических панорам из изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 1. С. 46–53.

Аннотация

Предмет исследования. Характерной чертой сферических панорам является максимально возможный угол обзора пространства ($360^\circ \times 180^\circ$). Всенаправленные оптико-электронные системы способны получать изображения, в которых отображается большая часть этого пространства, однако эти изображения отличны от канонической сферической панорамы. В работе предложен метод преобразования круговых изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами, к каноническим сферическим панорамным изображениям с использованием процедуры калибровки всенаправленной оптико-электронной системы. **Метод.** Процесс создания сферических панорам состоит из трех этапов. На первом этапе происходит формирование виртуальной поверхности в пространстве предметов, соответствующей полю зрения сферической панорамы. Поверхность задается посредством массива трехмерных точек. На втором этапе находятся координаты изображений этих точек в плоскости фотоприемника. На третьем этапе осуществляется поэлементное формирование выходного изображения из исходного всенаправленного изображения с использованием координат, полученных на втором этапе. **Основные результаты.** Рассмотрена геометрическая проекционная модель сферических панорам. Предложен алгоритм расчета массива трехмерных точек, характеризующего поле зрения сферической панорамы, удобный для практического применения. Разработанный метод предназначен для работы с всенаправленными оптико-электронными системами – как с зеркально-линзовыми оптическими системами, так и со сверхширокоугольными объективами типа «рыбий глаз». Представлены экспериментальные результаты, в которых среднеквадратическая ошибка перепроецирования составила 0,794 пиксела, что указывает на корректность предложенного в работе метода. **Практическая значимость.** Предложенный метод может найти применение в технологиях создания виртуальных туров и панорам улиц, где сферические панорамные изображения являются стандартом для хранения визуальной информации, а также в различных сферах робототехники, ориентации и навигации космических аппаратов и беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова

всенаправленные камеры, объективы типа «рыбий глаз», катадиоптрические камеры, преобразование изображений, сферические панорамы

Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

METHOD FOR CREATION OF SPHERICAL PANORAMAS FROM IMAGES OBTAINED BY OMNIDIRECTIONAL OPTOELECTRONIC SYSTEMS

V.P. Lazarenko^{a,b}, T.S. Dzhamiykov^c, V.V. Korotaev^a, S.N. Yarishev^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b EVS Ltd., Saint Petersburg, 195253, Russian Federation

^c Technical University of Sofia, Sofia, 1000, Bulgaria

Corresponding author: saiberbest@gmail.com

Article info

Received 22.07.15, accepted 17.11.15

doi:10.17586/2226-1494-2016-16-1-46-53

Article in Russian

For citation: Lazarenko V.P., Dzhamiykov T.S., Korotaev V.V., Yarishev S.N. Method for creation of spherical panoramas from images obtained by omnidirectional optoelectronic systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 46–53.

Abstract

Subject of Study. The key feature of spherical panoramas is the maximum possible angle of view (360×180 degrees). Omnidirectional optical-electronic systems are able to produce images that show most of this space, but these images are different from the canonical spherical panoramas. This paper proposes a method of converting the circular images obtained by omnidirectional optical systems, to canonical spherical panoramic images with the use of calibration procedure of omnidirectional optical-electronic system. **Method.** The process of spherical panoramas creation consists of three steps. The first step includes the forming of virtual surface in the object space corresponding to a field of view of the spherical panorama. The surface is defined by the three-dimensional array of pixels. At the second step the coordinates of images of these points in the plane of the detector are specified. At the third step pixel-by-pixel forming of the output image is performed from the original omnidirectional image with the use of coordinates obtained at the second step. **Main Results.** We have considered the geometric projection model of spherical panoramas. The algorithm has been proposed calculating the three-dimensional array of pixels, characterizing the field of view of a spherical panorama and convenient for practical usage. The developed method is designed to work with omnidirectional optical-electronic systems both with catadioptric optical systems and with fisheye lens. Experimental results confirming the validity of this method are presented. The reprojection mean-square error was equal to 0.794 px. **Practical Relevance.** The proposed method can be applied in technologies of creating of virtual tours or panoramas of streets where spherical panoramic images are the standard for storing visual information. The method may also find its application in various fields of robotics, orientation and navigation of space vehicles and UAVs.

Keywords

omnidirectional cameras, fisheye lens, catadioptric lens, image transformation, spherical panoramas

Acknowledgements

This work was partially financially supported by the Government of the Russian Federation, Grant 074-U01.

Введение

Всенаправленные оптико-электронные системы находят применение в тех сферах, где критичен большой угол обзора: эндоскопии, робототехнике, системах ориентации объектов, охранных системах, системах защиты военной техники и многих других. Однако изображения, получаемые всенаправленными оптико-электронными системами, имеют большую дисторсию. Более того, под этим классом оптических систем подразумевают различные типы систем, построенных на совершенно различных принципах, например, объективы типа «рыбий глаз» и механические сканирующие панорамные системы [1]. Все эти факторы затрудняют их использование в измерительных и наблюдательных телевизионных системах [2–4]. Исходя из этого, перед их практическим применением целесообразно произвести преобразование таких изображений к виду, наиболее удобному для практического применения.

В предыдущих работах [5–8] мы рассмотрели алгоритм получения перспективных изображений с исправленной дисторсией из всенаправленных изображений с использованием процедуры калибровки. Однако теоретически невозможно получить неискаженные изображения с углами обзора более или равными 180° , так как размеры таких изображений были бы бесконечными. Таким образом, у любого плоского изображения, отображающего более 180° пространства (такие изображения обычно называют панорамами), имеются характерные геометрические искажения. Однако в некоторых практических задачах во главе угла стоит не исправление дисторсии изображения, а, например, измерение угловых координат объектов или визуальное наблюдение в условиях ограниченного пространства. Для подобных целей будет перспективным использование сферических панорамных изображений, особенностью которых является максимально возможный угол обзора пространства ($360^\circ \times 180^\circ$), метод создания которых рассмотрен в настоящей работе.

Геометрическая проекционная модель сферических панорамных изображений

Представьте себе, что вы находитесь в центре сферы, сделанной из эластичного и прозрачного материала. Все, что вы видите, нарисовано на этой сфере. Теперь представьте, что сферу разрезали по одному из меридианов и растянули в прямоугольник шириной 360 и высотой 180 условных единиц. Математически такую проекцию сферической поверхности на плоскость можно получить, используя широту и долготу (либо зенитный и азимутальный углы соответственно) в качестве координат X и Y . На рис. 1 приведено изображение поверхности Земли в данной проекции. Для сферической проекции характерно растяжение в горизонтальном направлении, которое тем больше, чем ближе к полюсам сферы.

Несомненным преимуществом сферических панорамных изображений является то, что их линейные координаты могут быть выражены как угловые координаты в пространстве объектов. Это позволяет измерять угловые координаты объектов напрямую на сферическом панорамном изображении. Представьте, например, что имеется необходимость быстрого определения направления к летящему самолету по изображению. Если на сферическое панорамное изображение нанести координатную сетку, то задача будет решаться оператором практически мгновенно.

Таким же образом широко известные алгоритмы для определения на изображении координат малоразмерных объектов могут быть использованы без изменений, а для определения угловых координат необходимо лишь умножить найденные координаты на коэффициенты приведения.

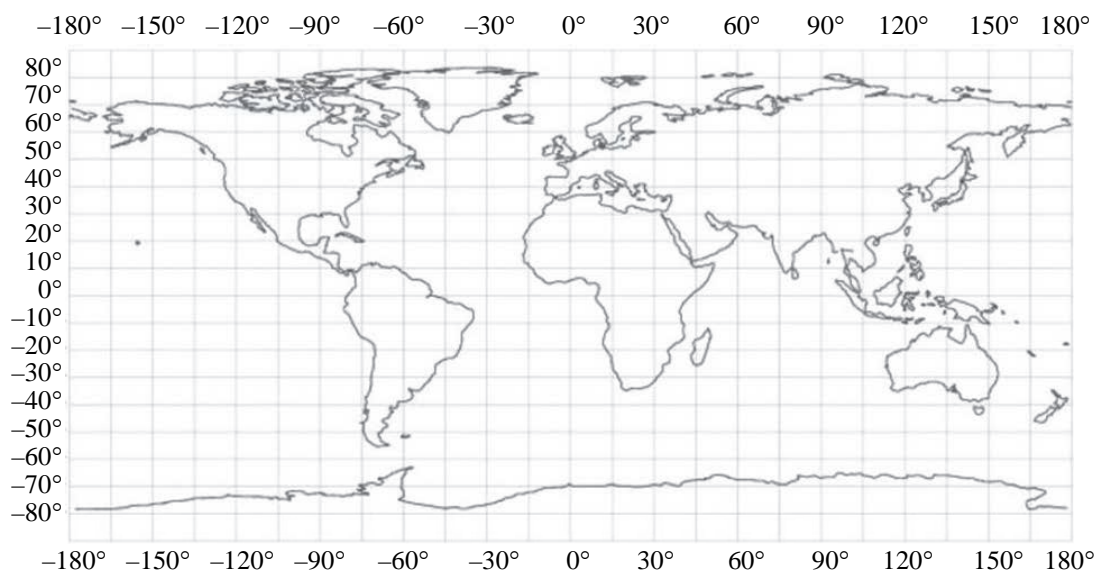


Рис. 1. Всенаправленная сферическая панорамная проекция Земли

Процедура калибровки всенаправленных оптико-электронных систем

Подробно выбор процедуры калибровки описан в наших предыдущих работах [8, 9]. В работе была использована процедура калибровки «OCamCalib Toolbox», разработанная Davide Scaramuzza [10]. Помимо высокой точности, ее преимуществом является простота проведения процесса калибровки (для калибровки всенаправленной оптико-электронной системы требуется сделать несколько снимков тест-объекта в виде шахматной доски). По окончании процесса калибровки «OCamCalib Toolbox» рассчитывает все необходимые параметры для передаточных функций калибруемой всенаправленной оптико-электронной системы [11], задающих прямую и обратную связь трехмерных координат точки в пространстве предметов и координат ее изображения в системе координат фотоприемника:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = world2cam \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right), \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = cam2world \left(\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} \right).$$

Метод создания сферических панорам из изображений, полученных всенаправленными оптико-электронными системами

Метод можно сформулировать в виде трех этапов:

1. формирование виртуальной поверхности в пространстве предметов, соответствующей полю зрения сферической панорамы. Поверхность задается посредством создания массива трехмерных точек, размер которого определяет разрешение панорамного изображения;
2. нахождение координат изображений этих точек в плоскости фотоприемника. При этом используется передаточная функция (1) всенаправленной оптико-электронной системы, найденная с помощью процедуры калибровки всенаправленных камер;
3. поэлементное (попиксельное) формирование выходного изображения из исходного всенаправленного изображения с использованием координат, полученных на втором этапе.

Первый этап. Формирование поверхности, характеризующей поле зрения сферической панорамы. В теории оптических систем обычно рассматривается не все пространство изображений, а только некоторая его плоскость, сопряженная с одной плоскостью пространства предметов [12]. Однако для всенаправленных оптических систем это утверждение неверно, в таких системах пространству изображений соответствует криволинейная поверхность в пространстве предметов. Так, например, для всенаправленных объективов типа «рыбий глаз» с угловым полем 180° пространству изображений будет соответствовать поверхность в пространстве предметов в виде полусферы. Зная это, мы можем рассмотреть схему получения сферической панорамы.

Центр прозрачной сферы единичного радиуса поместим в передней главной точке всенаправленной оптико-электронной системы. Допустим, что все окружающее пространство, находящееся вне сферы, отпечаталось в виде рисунка на сфере так, что для наблюдателя, находящегося в центре сферы, не было бы заметно разницы между окружающим пространством и его изображением на сфере (на рис. 2

точка p на сфере является рисунком точки P в пространстве объектов, а так как при прохождении света через оптическую систему теряется информация о дальности до объекта, то наблюдатель не заметит такой подмены). Затем разрежем сферу по одному из меридианов и растянем ее за полюса до плоского прямоугольника. Это наглядное представление того, как получить сферическую панораму всего окружающего пространства [13, 14].

Перейдем к рассмотрению алгоритма расчета сферической поверхности, характеризующей поле зрения сферической панорамы. На практике для создания сферической панорамы берется не вся сфера целиком, а та ее часть, которая находится в пределах поля зрения всенаправленной оптико-электронной системы, совмещенная с интересующей наблюдателя частью пространства объектов (сферическая поверхность $ABCC'B'A'$ на рис. 2).

Сферическую поверхность $ABCC'B'A'$ представим в виде массива M трехмерных точек $p_{i,j}$ размером H_{res} на V_{res} (горизонтальное и вертикальное разрешение выходного сферического панорамного изображения соответственно). Для того чтобы сформировать эту поверхность, необходимо задать начальные параметры. Исходя из того, что максимальное разрешение строки выходной панорамы достижимо на окружности, описанной вокруг всенаправленного изображения (рис. 3), на практике имеет смысл задавать горизонтальное разрешение H_{res} не более длины этой окружности, выраженной в пикселах:

$$H_{res} \leq 2\pi R_i,$$

где R_i – радиус всенаправленного изображения в пикселах.

Углы θ_{min} и θ_{max} выбираются в соответствии с требуемым угловым полем выходной панорамы, однако они должны лежать в пределах поля зрения всенаправленной оптической системы. При этом угол θ_{min} не рекомендуется устанавливать слишком малым, так как пространственное разрешение одной строки сферического панорамного изображения прямо пропорционально соответствующему ей углу наблюдения (а в пределе, при $\theta_{min}=0$, вся строка выходного сферического панорамного изображения будет соответствовать лишь одному центральному пикселу исходного кругового изображения).

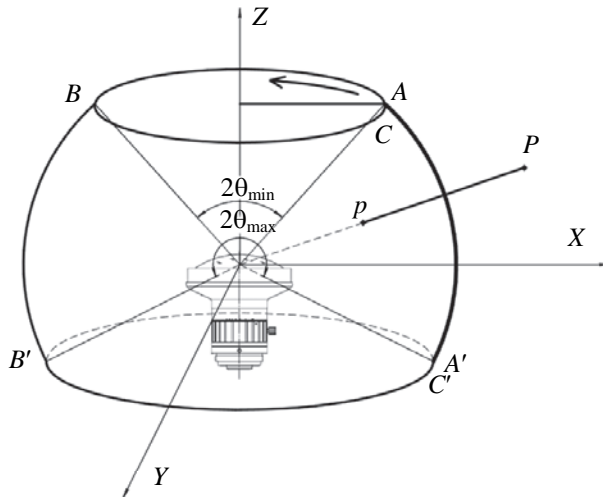


Рис. 2. Модель сферической проекции

Задав углы θ_{min} и θ_{max} , найдем вертикальное разрешение V_{res} выходного панорамного изображения:

$$V_{res} = (\theta_{max} - \theta_{min}) \cdot \frac{H_{res}}{2\pi}.$$

Зададим радиус сферической поверхности $ABCC'B'A'$ равным 1. При этом будем считать, что центр координат O совпадает с передней главной точкой всенаправленной оптико-электронной системы, а ось Z совпадает с оптической осью системы (рис. 4). Теперь зададим координаты точек $p_{i,j}$ сферической поверхности в сферической системе координат (рис. 4 и 5):

$$p_{i,j} = \begin{bmatrix} r_{i,j} \\ \theta_{i,j} \\ \varphi_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \theta_j \\ \varphi_i \end{bmatrix},$$

где $r_{i,j}=1$, $\theta_j = \theta_{min} + \frac{(\theta_{max}-\theta_{min})}{V_{res}} \times j$, $\varphi_i = \frac{2\pi}{H_{res}} \times i$.

Далее используем формулу перехода от сферической к декартовой системе координат:

$$p_{i,j} = \begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin \theta_j \cos \varphi_i \\ r \sin \theta_j \sin \varphi_i \\ r \cos \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_j \cos \varphi_i \\ \sin \theta_j \sin \varphi_i \\ \cos \theta_j \end{bmatrix}. \quad (2)$$

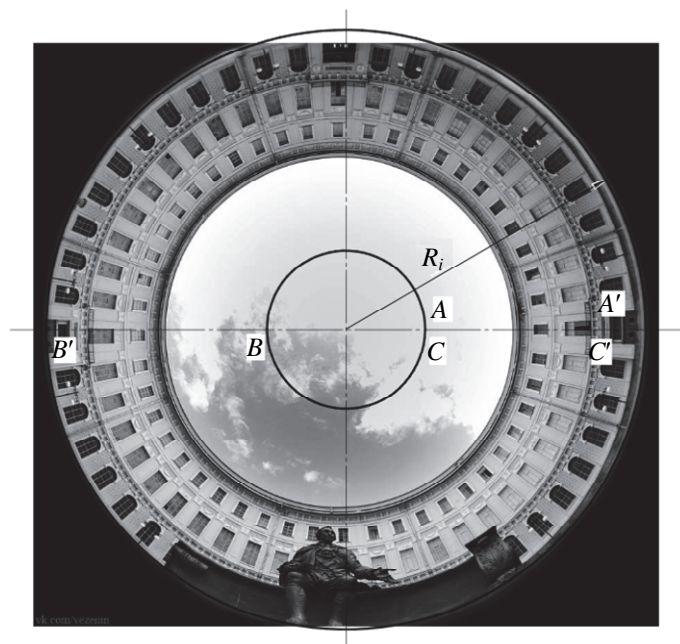


Рис. 3. Входное изображение, полученное с помощью камеры с объективом «рыбий глаз» (монумент графу Шувалову, установленный в круглом внутреннем дворе Санкт-Петербургской Академии художеств)

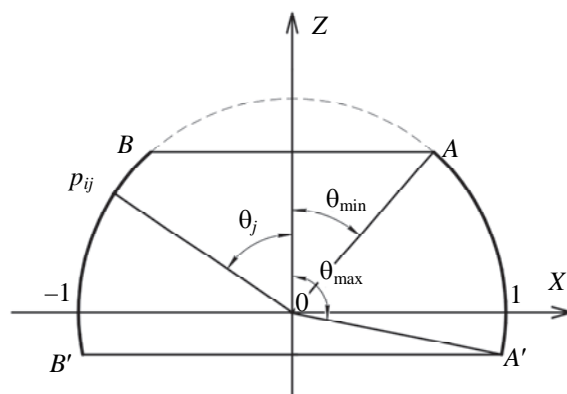


Рис. 4. Разрез сферической поверхности $ABCC'B'A'$ плоскостью ZOX

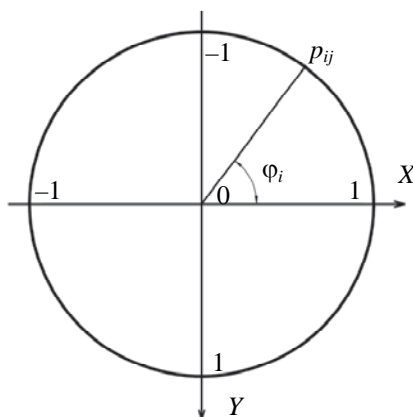


Рис. 5. Разрез сферической поверхности $ABCC'B'A'$ плоскостью XOY

Второй этап. Расчет массива отображения. Чтобы получить соответствие между пространственными координатами точки $p_{i,j}$, полученными в выражении (2), и пиксельными координатами p' ее изображения в системе координат фотоприемника, применим функцию прямой связи координат (1) с параметрами, рассчитанными в результате калибровки:

$$p'_{i,j} = \begin{bmatrix} u'_{i,j} \\ v'_{i,j} \end{bmatrix} = \text{world2cam}(p_{i,j}) = \text{world2cam} \left(\begin{bmatrix} \sin\theta_j \cos\varphi_i \\ \sin\theta_j \sin\varphi_i \\ \cos\theta_j \end{bmatrix} \right).$$

Таким образом, мы получим массив отображения M' , содержащий пиксельные координаты изображений точек для рассчитанного поля зрения сферической панорамы:

$$M' = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_{0,0} \\ v'_{0,0} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} u'_{H_{res-1},0} \\ v'_{H_{res-1},0} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} u'_{0,V_{res-1}} \\ v'_{0,V_{res-1}} \end{bmatrix} & \dots & \begin{bmatrix} u'_{H_{res-1},V_{res-1}} \\ v'_{H_{res-1},V_{res-1}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

Третий этап. Формирование сферического панорамного изображения. Теперь нам осталось только сформировать результирующее изображение попиксельно из исходного всенаправленного изображения, используя рассчитанный массив отображения:

$$I' = \begin{bmatrix} L(u'_{0,0}, v'_{0,0}) & \dots & L(u'_{H_{res-1},0}, v'_{H_{res-1},0}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L(u'_{0,V_{res-1}}, v'_{0,V_{res-1}}) & \dots & L(u'_{H_{res-1},V_{res-1}}, v'_{H_{res-1},V_{res-1}}) \end{bmatrix},$$

где L – величина сигнала в данном пикселе фотоприемника (или исходного всенаправленного изображения) с координатами $u'_{i,j}, v'_{i,j}$.

При этом повысить качество панорамного изображения можно с помощью применения алгоритмов интерполяции, так как мы имеем дело с дробными значениями координат. Кроме того, массив отображения M' рассчитывается лишь единожды и может быть использован далее для формирования сферических панорамных изображений в режиме реального времени с минимальными затратами процессорного времени для используемой оптико-электронной системы, что позволяет применять разработанный метод для обработки видеoinформации.

Основные результаты

Для проверки теоретических расчетов была произведена калибровка всенаправленной оптико-электронной системы с помощью инструментария «OSCamCalib Toolbox». Для этого было сделано 9 снимков тест-объекта в виде шахматной доски на калибруемую камеру. В качестве оптико-электронной системы была использована двухмегапиксельная IP-камера с установленным на нее сверхширокоугольным объективом типа «рыбий глаз» (Fujinon FE185C046HA-1).

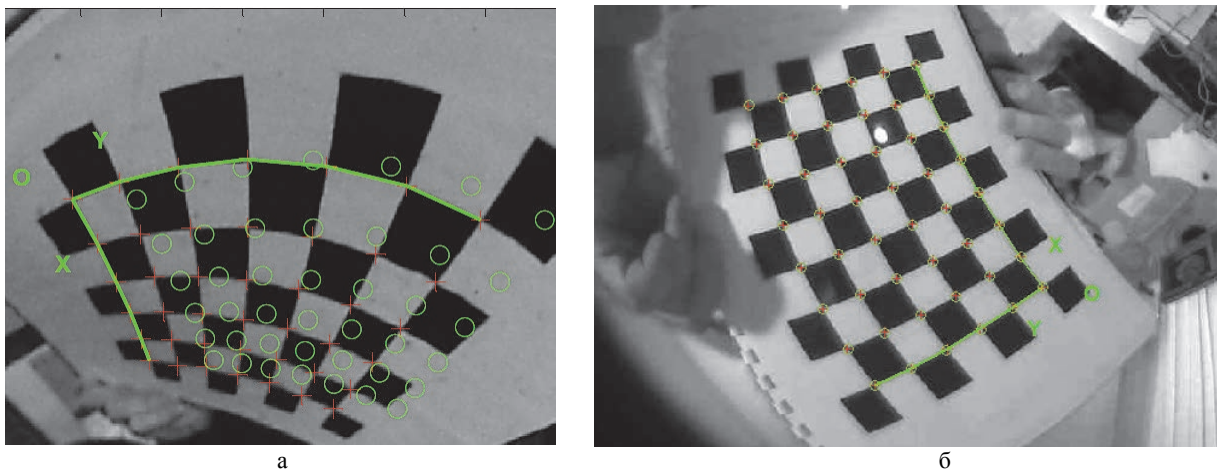


Рис. 6. Результаты калибровки с помощью инструментария «OSCamCalib Toolbox».

Красные кресты – найденные калибровочные точки тест-объекта, зеленые кружки – результат прецирования рассчитанных в процессе калибровки трехмерных координат калибровочных точек обратно на изображение: пример неверного определения калибруемых параметров [10] (а); результат экспериментальной калибровки – положение калибровочных точек и перепроцированных точек совпадает, что подтверждает верное определение калибруемых параметров оптико-электронной системы (б). Размер каждого квадрата паттерна – 50мм

Калибровка была произведена со следующими результатами:

- координаты центра кругового изображения (пиксел): $x_c' = 580,71$; $y_c' = 770,69$;
- среднеквадратическая ошибка перепроцирования (пиксел): 0,794;
- аффинные коэффициенты: $c = 0,99977$; $d = 9,13 \cdot 10^{-5}$; $e = -3,74 \cdot 10^{-4}$;
- коэффициенты полинома: $a_0 = -338,29$; $a_1 = 0$; $a_2 = 1,06 \cdot 10^{-7}$; $a_3 = 0$; $a_4 = 0$.

Как видно из результатов, среднеквадратическая ошибка перепроецирования (другими словами, это точность функции прямой связи координат *world2cam*) составила менее одного пиксела (рис. 6, б), что говорит о высокой точности произведенной процедуры калибровки, достаточной как для задач наблюдения, так и для большинства измерительных задач.

Далее авторами была написана программа, реализующая предложенный алгоритм. На рис. 3 показано входное изображение, сделанное с помощью камеры. На рис. 7 показана сферическая панорама с полусферическим полем зрения и отмеченными сферическими координатами, полученная с помощью программы.

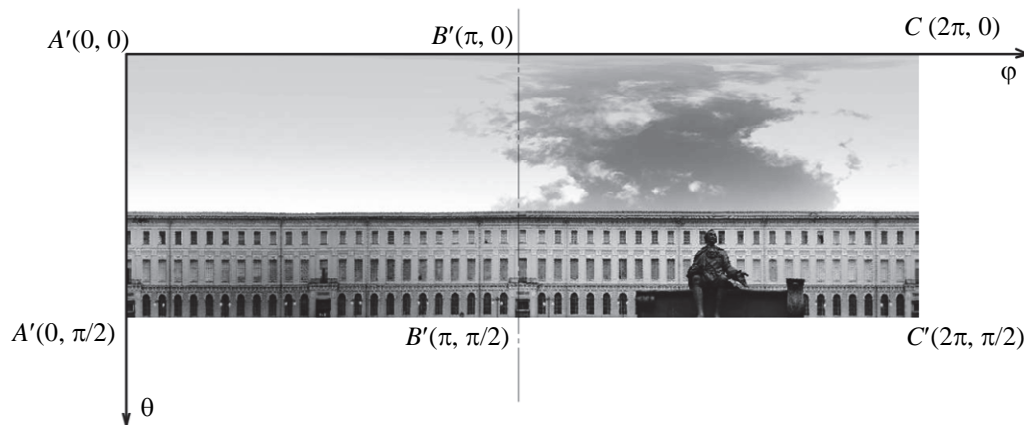


Рис. 7. Пример полусферической панорамы, полученной с помощью разработанного метода

Заключение

Разработан метод преобразования изображений, полученных всенаправленными камерами, в панорамные сферические изображения. Разработан алгоритм формирования облака точек, характеризующих поле зрения сферической панорамы, удобный для практического применения. Метод подходит для работы с всенаправленными оптико-электронными системами, как катадиоптрическими, так и с объективами типа «рыбий глаз».

Метод был успешно применен в программном модуле для программного обеспечения «Оптико-электронная система наблюдения «Тайфун», реализующем на основе всенаправленной камеры функцию отображения сферической панорамы в режиме реального времени [15].

Метод может быть использован в системах видеонаблюдения, где критичен большой угол обзора, а также в различных сферах робототехники и оптических измерительных систем, где важен не только широкий угол обзора, но и точность производимых измерений.

Важным преимуществом сферических панорамных изображений является то, что координаты такого изображения пропорциональны угловым координатам объектов в пространстве предметов, что позволяет производить измерение угловых координат объектов напрямую.

References

1. Solomatin V.A., Ivanova N.V. *Covremennye napravleniya razvitiya panoramnykh opticheskikh i optiko-elektronnykh sistem* [Modern trends in development of the panoramic optical and opto-electronic systems]. *Trudy Mezhdunarodnoi Konferentsii Prikladnaya Optika* [Proc. Int. Conf. on Applied Optics]. St. Petersburg, Russia, 2012, pp. 141–144.
2. Yarishev S., Konyahin I.A., Timofeev A.N. Universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2009, vol. 7133, art. 71333Y. doi: 10.1117/12.821251
3. Konyahin I.A., Timofeev A.N., Yarishev S.N. High precision angular and linear measurements using universal opto-electronic measuring modules in distributed measuring systems. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 160–164. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.160
4. Korotaev V.V., Konyahin I.A., Timofeev A.N., Yarishev S.N. High precision multimatrix optic-electronic modules for distributed measuring systems. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2010, vol. 7544, art. 75441E. doi: 10.1117/12.886294
5. Lazarenko V., Yarishev S. The algorithm for transforming a hemispherical field-of-view image. *Proc. 3rd Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision, OSAV'2012*. St. Petersburg, Russia, 2012, pp. 35–38.
6. Lazarenko V., Korotaev V., Yaryshev S. The algorithm for transformation of images from omnidirectional cameras. *Proc. Latin America Optics and Photonics Conference, LAOP 2014*. Mexico, 2014, art. LTh4A.43.
7. Lazarenko V.P., Yarishev S.N. *Algoritm transformatsii izobrazhenii s polusfericheskim polem zreniya* [Al-

- gorithm for image transformation with a hemispherical field of view]. *Aktual'nye Teoreticheskie i Prakticheskie Voprosy Sovremennogo Optiko-Elektronnogo Priborostroeniya* [Actual Theoretical and Practical Aspects of Modern Opto-Electronic Instrumentmaking]. Ed. V.V. Korotaev. St. Petersburg, NRU ITMO, 2012, pp. 103–105.
8. Lazarenko V.P., Djamiykov T.S., Korotaev V.V., Yaryshev S.N. Transformation algorithm for images obtained by omnidirectional cameras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 1, pp. 30–39 (in Russian) doi: 10.17586/2226-1494-2015-15-1-30-39
 9. Lazarenko V.P., Yaryshev S., Korotaev V. The algorithm for generation of panoramic images for omnidirectional cameras. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2015, vol. 9530, art. 95300K. doi: 10.1117/12.2184584
 10. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion. *Proc. 4th IEEE Int. Conf. on Computer Vision Systems, ICVS'06*. NY, USA, 2006, vol. 2006, art. 1578733, p. 45. doi: 10.1109/ICVS.2006.3
 11. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras. *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS 2006*. Beijing, China, 2006, art. 4059340, pp. 5695–5701. doi: 10.1109/IROS.2006.282372
 12. Volosov D.S. *Fotograficheskaya Optika. Teoriya, Osnovy Proektirovaniya, Opticheskie Kharakteristiki* [Photographic Optics. Theory, Principles of Design, Optical Characteristics]. Moscow, Iskusstvo Publ., 1978, 543 p.
 13. Brosz J., Samavati F. Shape defined panoramas. *Proc. Int. Conf. on Shape Modeling and Applications, SMI 2010*. Aix-en-Provence, France, 2010, pp. 57–67. doi: 10.1109/SMI.2010.23
 14. Salomon D. *Transformations and Projections in Computer Graphics*. Springer-Verlag, 2006, 283 p.
 15. Golushko M.N., Yaryshev S.N. Optiko-elektronnaya sistema nablyudeniya "Taifun" [Optoelectronic observing system "Typhoon"]. *Voprosy Radioelektroniki. Seriya: Tekhnika Televideniya*, 2014, no. 1, pp. 38–42.

Лазаренко Василий Петрович	–	аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер-программист, ООО «ЭВС», Санкт-Петербург, 195253, Российская Федерация, saiberbest@gmail.com
Джамийков Тодор Стоянов	–	PhD, профессор, доцент, Технический Университет, София, 1000, Болгария, tsd@tu-sofia.bg
Коротаев Валерий Викторович	–	доктор технических наук, профессор, декан факультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, korotaev@grv.ifmo.ru
Ярышев Сергей Николаевич	–	кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ysn63@mail.ru
Vasily P. Lazarenko	–	postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer, EVS Ltd., Saint Petersburg, 195253, Russian Federation, saiberbest@gmail.com
Todor S. Djamiykov	–	PhD, Professor, Associate professor, Technical University of Sofia, Sofia, 1000, Bulgaria, tsd@tu-sofia.bg
Valery V. Korotaev	–	D.Sc., Professor, Dean, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, korotaev@grv.ifmo.ru
Sergey N. Yaryshev	–	PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ysn63@mail.ru