

## Формирование панорамного изображения с учетом параллакса при известной модели окружающего мира

Д. С. Толкачев

*Видеосистемой кругового обзора* будем называть систему, отображающую окружающую обстановку с углом обзора до  $360^\circ$  по горизонтали в реальном времени и для всех направлений одновременно. Подобные системы могут устанавливаться на мобильные платформы (автомобили, роботизированные тележки) для облегчения задач вождения [1] или осуществления удаленного управления транспортным средством. Изображение с большим углом обзора, называемое *панорамой*, позволяет ценой уменьшения детализации и внесения определенных геометрических искажений представить на плоскости окружающее наблюдателя пространство. Изображения с большим углом обзора можно получить с помощью различных оптических устройств (рис. 1): широкоугольных объективов типа «рыбий глаз» [2], у которых угол обзора составляет около  $180^\circ$  вдоль диагонали кадра; панорамных катадиоптрических систем, в основе которых лежит зеркало сферической или другой формы [3], позволяющее получить изображение с углами обзора до  $360^\circ$  по горизонтали и более  $100^\circ$  по вертикали. Основной недостаток подобных оптических устройств: невысокое и неравномерное разрешение итоговой панорамы. По этим причинам широкое распространение получили методы формирования панорамы из нескольких перекрывающихся изображений, полученных камерой, вращающейся вокруг оптического центра объектива [4]. Выполнение этого требования означает, что исходные изображения лишены *параллакса*; в этом случае на формируемой панораме идеально совместятся как близко, так и далеко расположенные объекты. С целью минимизации параллакса в видеосистемах кругового обзора, где невозможно все камеры разместить в одной точке, камеры стараются расположить как можно компактнее [5] или используют систему зеркал, вокруг которой располагаются камеры [6].

Подобное беспараллаксное размещение камер вынуждает размещать видеосистему кругового обзора сверху, где обзор не закрывается элементами конструкции, что в определенных случаях вступает в конфликт с конструкторскими или дизайнерскими решениями по установке камер, а также повышает заметность системы. В этих случаях камеры приходится располагать далеко друг от друга (например, по бортам транспортного средства, где их обзор не ограничивают элементы конструкции), следовательно, влиянием параллакса нельзя пренебречь.

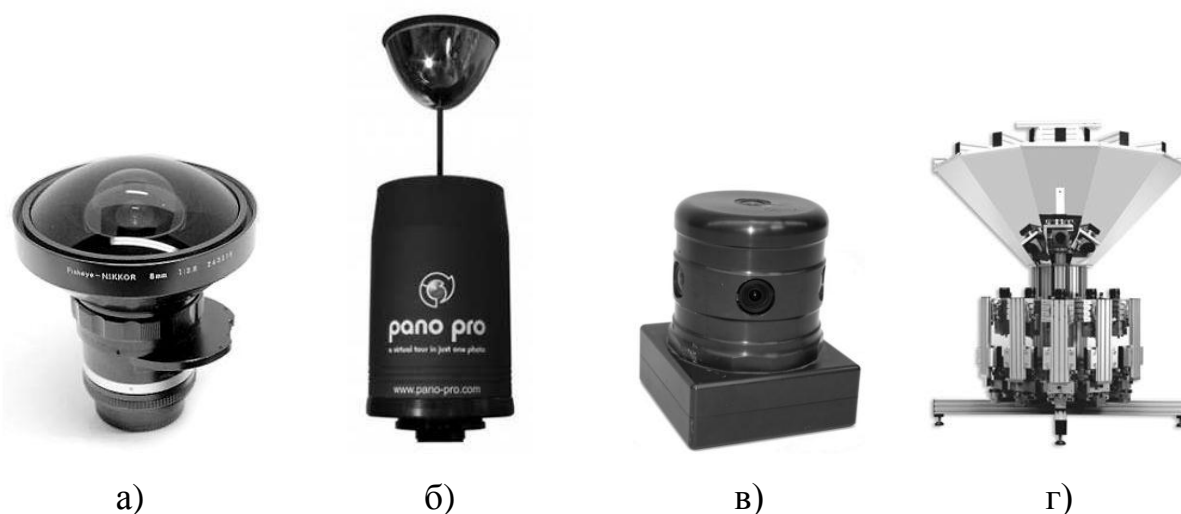


Рис. 1. Разнообразие конструкций, используемых для формирования панорам: а) объектив типа «рыбий глаз»; б) параболическое зеркало; в) компактное размещение камер; г) система зеркал.

Для получения панорамного изображения с учетом параллакса необходимо иметь информацию о внутренних и внешних параметрах камеры, которые могут быть оценены в результате калибровки камер и всей системы, а также информацию об удаленности объектов сцены. На основе этой информации будет производиться преобразование входных изображений.

Введем следующие трехмерные системы координат (рис. 2). В *глобальной системе координат*  $W$  (приведена для общности, в дальнейшем эта система координат применяться не будет) перемещается мобильная платформа, к которой привязана *объектная система координат*  $O$ . На платформе в системе координат  $O$  расположено размещены камеры с соответствующими *камероцентрическими системами координат*  ${}^kC$ , где  $k$  – номер камеры.

Наконец, относительно  $\mathbf{O}$  определена *наблюдательная система координат*  $\mathbf{S}$ , относительно которой производится построение панорамы. Все трехмерные системы координат являются *правыми*. Оси  ${}^0\mathbf{X}$ ,  ${}^0\mathbf{Y}$ ,  ${}^0\mathbf{Z}$  соответственно направлены вправо, вперед и вверх относительно мобильной платформы; оси  ${}^k\mathbf{X}$ ,  ${}^k\mathbf{Y}$ ,  ${}^k\mathbf{Z}$ , а также оси  ${}^s\mathbf{X}$ ,  ${}^s\mathbf{Y}$ ,  ${}^s\mathbf{Z}$  соответственно направлены вправо и вниз от камеры (точки наблюдения), т.е. более далекие объекты имеют большие значения координаты  $\mathbf{Z}$ . Кроме трехмерных систем координат будем использовать следующие двумерные системы координат: системы координат входных изображения  ${}^k\mathbf{I}$ , и система координат панорамного изображения  $\mathbf{P}$ , которые образованы двумя перпендикулярными осями  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$ , при этом ось  $\mathbf{U}$  направлена вправо, а ось  $\mathbf{V}$  направлена вниз.

Для получения панорамного изображения  $\mathbf{P}$  из исходных изображений  ${}^k\mathbf{I}$  необходимо выполнить соответствующие геометрические преобразования, связывающие координаты точки на панораме  ${}^P\mathbf{u}$  с координатами точки на входном изображении  ${}^k\mathbf{u}$ . Как правило, такую зависимость выражают в виде функции *обратного отображения* [7, с. 278], связывающего точки  ${}^P\mathbf{u}$  и  ${}^k\mathbf{u}$ :

$${}^k\mathbf{u} = {}^k\mathbf{M}^{-1}({}^P\mathbf{u}). \quad (1)$$

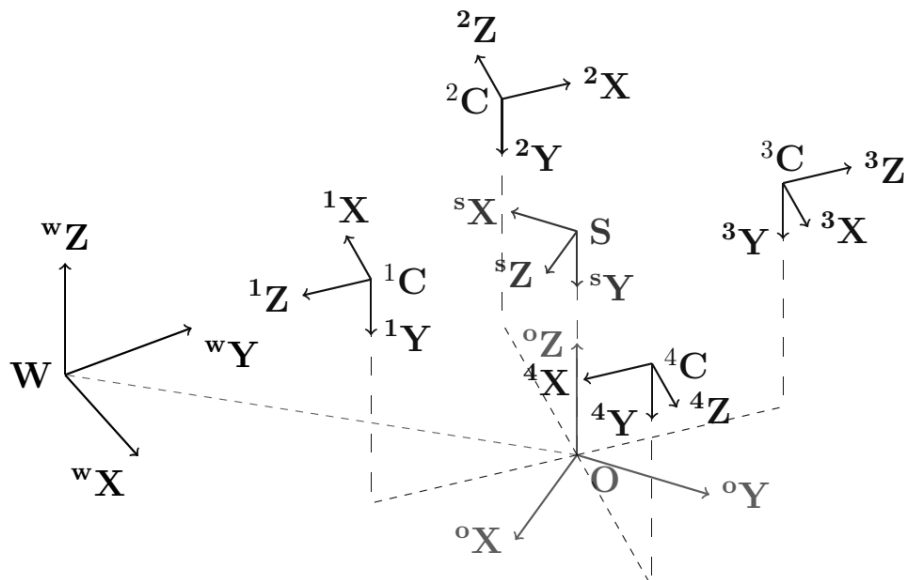


Рис. 2. Используемые системы координат: глобальная система координат  $\mathbf{W}$ ; объектная система координат  $\mathbf{O}$ ; четыре камероцентрических системы координат  ${}^1\mathbf{C}$ ,  ${}^2\mathbf{C}$ ,  ${}^3\mathbf{C}$  и  ${}^4\mathbf{C}$ ; наблюдательная система координат  $\mathbf{S}$ .

Функция обратного отображения (1) может быть представлена в виде последовательности преобразований:

1. Преобразование координат панорамного изображения  ${}^P\mathbf{u} = ({}^P u, {}^P v)$  в координаты  ${}^S\mathbf{x} = ({}^S x, {}^S y, {}^S z)$  наблюдательной системы координат  $\mathbf{S}$ . Для этого удобно воспользоваться сферической системой координат с центром в точке  $\mathbf{S}$  в которой точка  ${}^S\mathbf{x}$ , описывается углами *азимута*  $\lambda \in (-\pi; \pi]$  (угол между осью  ${}^S\mathbf{Z}$  и проекцией вектора  ${}^S\mathbf{x}$  на плоскость  ${}^S\mathbf{X}{}^S\mathbf{Z}$ ) и *высоты*  $\varphi \in (-\pi/2; \pi/2)$  (угол, образованный вектором  ${}^S\mathbf{x}$  и его проекцией на плоскость  ${}^S\mathbf{X}{}^S\mathbf{Z}$ ) и расстоянием  $\rho$  (длина вектора  ${}^S\mathbf{x}$ ). Углы  $\lambda$  и  $\varphi$  зависят от координат  $({}^P u, {}^P v)$  и определяются проекцией панорамного изображения. Например, для сферической (более корректный термин цилиндрической равнопромежуточной) проекции углы  $\lambda$  и  $\varphi$  пропорциональны координатам  $({}^P u, {}^P v)$  [8]:

$$\begin{aligned}\lambda &= ({}^P u - u_0) / f, \\ \varphi &= ({}^P v - v_0) / f,\end{aligned}\tag{2}$$

где  $f$  – масштабирующий множитель,  $(u_0, v_0)$  – координаты точки на панорамном изображении, для которой угловые координаты  $\lambda$  и  $\varphi$  равны 0. Для панорамного изображения с углом охвата  $360^\circ$  по вертикали масштабирующий множитель целесообразно брать таким, чтобы ширина панорамы  $w = 2 \pi f$  была целым числом. В этом случае при замыкании панорамы в кольцо ее края совпадут. Третья координата – расстояние  $\rho$  – может быть задана априорно или оценена различными методами, и предполагается известной и зависящей от угловых координат:

$$\rho = f(\lambda, \varphi).\tag{3}$$

Переход от сферических координат  $(\lambda, \varphi, \rho)$  к координатам  $({}^S x, {}^S y, {}^S z)$  осуществляется по известным формулам перехода от сферической системы координат к декартовой:

$$\begin{aligned}{}^S x &= \rho \cos \varphi \sin \lambda, \\ {}^S y &= \rho \sin \varphi, \\ {}^S z &= \rho \cos \varphi \cos \lambda.\end{aligned}\tag{4}$$

2. Переход от наблюдательной системы координат  $\mathbf{S}$  к объектной системе координат  $\mathbf{O}$  осуществляется с помощью выражения вида

$${}^{\mathbf{O}}\mathbf{x} = [{}^{\mathbf{S}}\mathbf{R} \mid {}^{\mathbf{S}}\mathbf{t}] {}^{\mathbf{S}}\mathbf{x}, \quad (5)$$

где  ${}^{\mathbf{S}}\mathbf{R}$  и  ${}^{\mathbf{S}}\mathbf{t}$  – матрица поворота и вектор переноса, определяющие переход от наблюдательной системы координат к объектной. Положение точки наблюдения может быть выбрано произвольно.

3. Переход к системе координат камеры  ${}^k\mathbf{C}$  из объектной системы координат  $\mathbf{O}$  осуществляется аналогично (4). Для этого должны быть известны *внешние параметры камер*  ${}^k\mathbf{R}$  и  ${}^k\mathbf{t}$ , которые могут быть найдены в процессе калибровки видеосистемы кругового обзора:

$${}^k\mathbf{x} = [{}^k\mathbf{R} \mid {}^k\mathbf{t}] {}^{\mathbf{S}}\mathbf{x}. \quad (6)$$

4. Проективное преобразование, осуществляющее переход от трехмерных координат  ${}^k\mathbf{x} = ({}^kx, {}^ky, {}^kz)$  к двумерным нормированным координатам  ${}^k\mathbf{u}' = ({}^ku', {}^kv')$ , где

$$\begin{aligned} {}^ku' &= {}^kx / {}^kz, \\ {}^kv' &= {}^ky / {}^kz. \end{aligned} \quad (7)$$

5. Исправление геометрических искажений (дисторсии) камеры необходимо для компенсации искажений, вносимых широкоугольной оптикой. Модель искажений выбирается в зависимости от характеристик объектива. Например, может применяться следующая модель исправления дисторсии, определяемая тремя коэффициентами радиальных искажений  $k_1, k_2, k_3$  и двумя коэффициентами тангенциальных искажений  $p_1$  и  $p_2$  [9, с. 396] (для краткости верхние индексы  $k$  опущены):

$$\begin{aligned} u'' &= u' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2 p_1 u' v' + p_2 (r^2 + 2u'^2), \\ v'' &= v' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2 p_2 u' v' + p_1 (r^2 + 2v'^2), \\ r^2 &= u'^2 + v'^2. \end{aligned} \quad (8)$$

здесь  ${}^k\mathbf{u}'' = ({}^ku'', {}^kv'')$  – координаты точки с коррекцией геометрических искажений.

6. Переход к координатам изображения  ${}^k\mathbf{u} = ({}^ku, {}^kv)$  осуществим при известных *внутренних параметрах* каждой камеры:

$$\begin{aligned} {}^k u &= {}^k f_u {}^k u'' + {}^k c_u, \\ {}^k v &= {}^k f_v {}^k v'' + {}^k c_v, \end{aligned} \quad (9)$$

где  ${}^k f_u, {}^k f_v$  – фокальные расстояния по обеим осям (в общем случае, масштаб изображения по вертикали и горизонтали может отличаться);  ${}^k c_u, {}^k c_v$  – координаты точки пересечения оптической оси камеры и плоскости изображения.

Таким образом, функция обратного отображения (1), позволяющая перейти от координат на панораме к координатам изображения выбранной камеры, может быть представлена в виде последовательности операций (2)–(9) и параметризуется несколькими наборами параметров:

- внутренние параметры камеры ( ${}^k f_u, {}^k f_v, {}^k c_u, {}^k c_v$ ) и
- коэффициенты дисторсии ( ${}^k k_1, {}^k k_2, {}^k k_3, {}^k p_1$  и  ${}^k p_2$ ) определяются в процессе индивидуальной калибровки каждой камеры системы обзора;
- внешние параметры камеры (матрица поворота  ${}^k \mathbf{R}$  и вектор переноса  ${}^k \mathbf{t}$ ), которые могут быть получены при калибровке системы обзора [10];
- параметры системы координат, в которой строится панорама ( ${}^s \mathbf{R}$  и  ${}^s \mathbf{t}$ ), задающиеся произвольно;
- функцией расстояния до объектов сцены  $\rho = f(\lambda, \varphi)$ , которую для меняющейся сцены необходимо оценивать динамически или же задавать априорно.

Для построения панорамного изображения необходимо иметь набор функций отображения  ${}^k \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{P}\mathbf{u})$  для каждого входного изображения. Значения этих функций целесообразно вычислить один раз и запомнить в соответствующих таблицах (при статической модели мира). Такой подход позволит формировать панорамное видеоизображение в реальном времени. Расчет значений функции  ${}^k \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{P}\mathbf{u})$  при формировании таблицы разумно предварить определением границ изображения на панораме, т.е. найти область определения функции  ${}^k \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{P}\mathbf{u})$ . Возможный подход – последовательность операций, обратная (2)–(9) – осложнен тем, что функция расстояний до объектов сцены (3), а также моделирование дисторсии объектива (8) не имеют обратных преобразований, следовательно, необходим итеративный подход. Другой подход

нахождения области определения функций: рассчитать их значения для уменьшенной панорамы, пересчитать их для полноразмерной панорамы и при необходимости уточнить.

Отдельного упоминания заслуживает модель окружающего мира. К сожалению, формирование картины окружающего мира в режиме реального времени весьма сложная задача, поэтому в данной статье ограничимся использованием заранее определенной статической модели окружающего мира. В качестве такой модели рассмотрим использование сферы заданного радиуса и «полусферы»: сферы, ограниченной снизу плоскостью (не обязательно проходящей через центр сферы).

На рис. 3 приведены примеры панорамного изображения, полученного в реальных условиях, для разных дальностей «сшивки». Можно заметить, что на близких расстояниях плохо совмещаются объекты на удалении, и наоборот.



Рис. 3. – Панорамное изображение при разных дальностях «сшивки»: 20 м (сверху), бесконечная дальность (снизу).

На рис. 4 показана укрупненная часть панорамного изображения при сшивке для сферической поверхности, и для «полусферы», ограниченной дорожной поверхностью. Положительные качества второго варианта отображения заключаются в увеличенной ширине дороги, лучшем совмещении близкорасположенных автомобилей. Недостатки представлены в виде характерных искажений объектов в нижней полусфере, особенно заметные на границах перехода плоскости в сферу.



Рис. 4. – Центральная часть панорамы при «сшивке» на бесконечном расстоянии для сферической поверхности (сверху) и для «полусферы» (снизу).

Таким образом, представленная модель видеосистемы кругового обзора позволяет формировать панорамное изображение для известной модели мира. Заранее рассчитанные функции преобразования (1) позволяют производить сшивку видеопанорамы в режиме реального времени. В различных ситуациях могут оказаться подходящими различные модели окружающего мира, разработанный алгоритм позволяет их динамически менять.

### Литература

1. Рыжкина, Е.С. Период самостоятельного практического вождения молодых водителей – как наиболее опасный. [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 (часть 1). – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1211> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.



2. Wang X., Wu K., Y. Cheng. Research on Virtual 3D Station based on Images // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2013. – Vol. 7, No. 1L. – P. 225–231.

3. Folded catadioptric panoramic lens with an equidistance projection scheme / Gyeong-II Kweon, Kwang Taek Kim, Geon-Hee Kim et al. // Applied Optics. – 2005. – Vol. 44. – P. 2759–2767.

4. Szeliski Richard. Image alignment and stitching: a tutorial // Found. Trends. Comput. Graph. Vis. – 2006. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–104.

5. Utsugi K., Moriya T. A Camera Revolver for Improved Image Stitching // IARP Workshop on Machine Vision Applications. – 2002. – P. 261–264.

6. Geometrical Design Concept for Panoramic 3D Video Acquisition / O. Schreer, P. Kauff, P. Eisert et al. // 20th European Signal Processing Conference. – 2012. – P. 2757–2761.

7. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М. : Техносфера, 2007. – 584 с.

8. Weisstein, E. Cylindrical Equidistant Projection: [Электронный документ]. –

(<http://mathworld.wolfram.com/CylindricalEquidistantProjection.html>). Проверено 15.06.2013

9. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV.– Sebastopol: O'Reilly, 2008.– 555 p.

10. Толкачев, Д.С. Повышение точности калибровки внешних параметров видеокамеры [Электронный ресурс]. // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.