

ИКОНИКА – НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

УДК 004.932

МЕТОД КОНВЕРТАЦИИ 2D-ИЗОБРАЖЕНИЯ В СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЕ 3D-ИЗОБРАЖЕНИЕ

© 2014 г. Н. Н. Красильников, доктор техн. наук; О. И. Красильникова, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург

E-mail: NNKrasilnikov@yandex.ru

Описан метод конвертации 2D-изображения сцены в стереоскопическое 3D-изображение. В основу метода положена аппроксимация изображений составляющих ее объектов набором плоскостей с последующей декомпозицией изображения на эти плоскости. Затем рассчитывается аксонометрическая проекция и карта глубины каждой плоскости с использованием для этой цели имеющейся у зрителя априорной информации об изображенных объектах. После этого выполняется “сборка” аксонометрических проекций аппроксимирующих плоскостей и преобразование масштаба, в результате которых находится 3D-изображение сцены. Завершающим этапом описываемого метода является формирование стереопары и вывод стереоизображения на экран дисплея при заданном ракурсе и расстоянии наблюдения. Изложение сопровождается демонстрацией изображений, полученных данным методом.

Ключевые слова: конвертация 2D-изображения, 3D-изображение, стереоскопические изображения.

Коды OCIS: 100.6890

Поступила в редакцию 21.10.2013

Введение

При проецировании трехмерных сцен и объектов на поверхности, как известно, координата глубины утрачивается и получившиеся при этом изображения оказываются двумерными. Однако при рассматривании этих изображений, например фотографий, изображенные на них сцены и объекты воспринимаются как неплоские, размещенные в пространстве в определенном порядке. Отмеченное положение справедливо и в отношении непосредственного монокулярного наблюдения сцен, при котором они хрусталиком глаза проецируются на сетчатку. Объясняется это тем, что в проекции сцены (изображении), как правило, содержится информация, используя которую совместно с априорной информацией о наблюдаемых сценах, имеющейся у зрителя, зрительная система человека восстанавливает утраченную при про-

ецировании информацию о координате глубины. К этой информации относятся искажения расстояний между различными точками объектов, возникающие на изображении в результате центральной проекции [1, 2], эффект частичного заслонения ближним объектом более удаленного объекта, если они находятся на одной линии наблюдения, расположение по отношению к линии горизонта объектов, находящихся на одной и той же поверхности [3]. Кроме того к ней относятся распределение полутеней по поверхности объектов, которые определяются взаимным расположением источников света и ориентацией поверхностей оболочек объектов в различных точках [4], наличие атмосферной дымки (воздушная перспектива), а также удаленность от источников освещения и др.

Свойство зрительной системы восстанавливать координату глубины, используя перечисленную выше информацию, начали активно

применять еще художники эпохи Возрождения. В последнее время в связи с развитием цифровых методов обработки сигналов возрос интерес к 3D-технологиям как в медиаиндустрии, так и в смежных областях обработки и демонстрации изображений. Сюда относятся разработки 3D-сканеров, предназначенных для получения 3D-изображений путем сканирования натуральных сцен, 3D-дисплеев для демонстрации стереоскопических изображений, систем 3D-телевидения, а также создание 3D-кинотеатров. Эти работы настолько интенсивны, что Интернет буквально переполнен их описаниями и маркетинговыми предложениями. Однако почти полное отсутствие 3D-контента для демонстрации в 3D-кинотеатрах и 3D-телевидении оказалось узким местом, так как съемка 3D-фильмов обходится весьма дорого. Это привело к попыткам разработать методы и алгоритмы, которые позволили бы преобразовать 2D-контент в 3D-контент, в частности для применения в 3D-телевизорах в виде специальных функций. Такие методы и алгоритмы, которые в результате анализа передаваемой картинки определяют взаимное расположение объектов по глубине на основании их движения, взаимного перекрытия, а также разницы в цвете и контрасте объектов различных планов, были разработаны. Однако полученные результаты показали низкое качество достигаемого при этом 3D-эффекта [5].

В статье излагается метод конвертации 2D-изображений объектов и сцен, основанный на их аппроксимации плоскостями, в 3D-изображения с последующим получением их стереоскопического отображения [6].

Преобразование прямых линий и плоского прямоугольника при центральной проекции

Рассмотрим свойства перспективных преобразований прямых линий и плоского прямоугольника при их центральной проекции на плоскость.

1. В общем случае прямая линия на объекте при центральной проекции проецируется в прямую линию на изображении, но с неравномерной шкалой. Так движение точки по прямой линии на объекте с постоянной скоростью отображается ее движением на изображении также по прямой линии, но с неравномерной

скоростью. При этом, чем больше удаляется точка, тем меньше становится видимая скорость ее движения. Следствием этой неравномерности шкалы является изменение соотношений длин и площадей в пространстве и в центральной проекции.

2. Параллельные прямые линии в пространстве изображаются в центральной проекции также прямыми линиями, сходящимися в одной точке, называемой точкой схода. Каждая отдельная группа параллельных линий имеет свою точку схода. Исключением из этого правила является случай, когда прямые линии в пространстве параллельны плоскости, на которую они проецируются. При этом на изображении линии также остаются параллельными, но не имеют точки схода, а шкала проекции остается равномерной.

Продолжая рассмотрение, выберем правостороннюю систему координат и обратимся к рис. 1, на котором приведена модель камеры с передней плоскостью изображения. Рассмотрим центральную проекцию плоского прямоугольника на переднюю плоскость изображения, координатную ось z декартовой системы координат совместим с осью камеры, а оси x и y – с плоскостью изображения.

На рис. 1 использованы следующие обозначения: $y_{об}$ – координата, которая определяет высоту прямоугольника (объекта), L_1 – расстояние между ближайшей к камере вертикальной границей прямоугольника и центром объектива, L_2 – расстояние между плоскостью, параллельной передней плоскости изображения, в которой лежит вертикальная граница

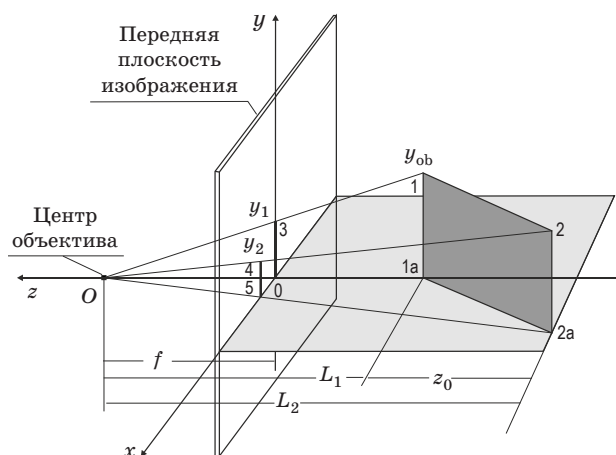


Рис. 1. Модель камеры с передней плоскостью изображения.

прямоугольника 2–2а и центром объектива, f – фокусное расстояние объектива, z_0 – расстояние по глубине между вертикальными границами прямоугольника, y_1 – размер проекции ближайшей к камере вертикальной границы прямоугольника, на переднюю плоскость изображения, y_2 – размер проекции удаленной от камеры вертикальной границы прямоугольника.

Из подобия треугольников 1–1а–О и 3–0–О следует, что

$$y_1/f = y_{ob}/L_1, \quad (1)$$

а из подобия треугольников 2–2а–О и 4–5–О следует, что

$$y_2/f = y_{ob}/L_2. \quad (2)$$

В общем случае, размер проекции y линии протяженностью y_{ob} , которая параллельна плоскости проецирования независимо от ее углового положения по отношению к координатным осям x и y и удалена от центра объектива на расстояние L , имеет место соотношение

$$y = y_{ob} f/L, \quad (3)$$

где отношение f/L можно рассматривать как масштабирующий множитель. Отсюда следует, что любая точка объекта с координатами x_{ob} , y_{ob} отобразится на проекции точкой с координатами x , y

$$x = x_{ob} f/L, \quad y = y_{ob} f/L. \quad (4)$$

Из формулы (3), в частности, следует, что при $L = f$ длина проекции линии равна длине самой проецируемой линии. Решая совместно уравнения (1) и (2), найдем расстояние по глубине между двумя границами прямоугольника 1–1а и 2–2а

$$z_0 = L_1 \frac{y_1 - y_2}{y_2}. \quad (5)$$

Обратимся теперь к задаче определения истинных размеров плоского прямоугольника по его центральной проекции. Будем считать, что известна следующая априорная информация о наблюдаемом объекте (плоском прямоугольнике) и условиях наблюдения:

- вертикальные стороны прямоугольника параллельны плоскости проекции, которая, в свою очередь, перпендикулярна горизонтальной плоскости,

- плоскость прямоугольника повернута на угол α_0 относительно направления главного луча,

- фокусное расстояние объектива, использованного при фотографировании, равно f ,

- расстояние, с которого проводилось фотографирование, равно L_1 .

Поскольку размер проекции удаленной стороны вследствие перспективных искажений будет меньше размера проекции ближайшей стороны, то проекция прямоугольника будет иметь вид трапеции.

Высота прямоугольника y_{ob} определится путем решения уравнения (1) относительно y_{ob} , т.е.

$$y_{ob} = y_1 L_1 / f.$$

Чтобы определить ширину прямоугольника L_{ob} , сначала найдем расстояние по глубине z_0 между его вертикальными сторонами по формуле (5). Так как плоскость прямоугольника составляет с главным лучом угол α_0 , то глубину z_0 можно рассматривать как результат проекции его горизонтальной стороны на вертикальную плоскость, в которой лежит главный луч. Отсюда следует, что

$$L_{ob} = z_0 / \cos \alpha_0. \quad (6)$$

Несмотря на простоту, рассмотренный случай важен, так как на практике часто встречаются объекты, оболочки которых могут быть аппроксимированы плоскостями прямоугольной формы. Например, фасады зданий, их интерьеры, предметы мебели и проч.

Отметим, что и в случае плоского многоугольника со сторонами, произвольно ориентированными относительно плоскости проецирования, методика расчета остается аналогичной.

Определение линии горизонта

Во многих реальных изображениях содержится информация, достаточная для определения положения линии горизонта, используемого в ряде случаев при вычислении координат глубины изображаемых объектов [3]. В качестве примера назовем фотографии городской застройки, поскольку в них имеются объекты, включающие в себя области с горизонтальными границами, например стены зданий, их окна и др. Рассмотрим метод определения положения линии горизонта, для чего обратимся к изображению левого здания, представленного на рис. 2. Поскольку верхняя и нижняя границы его фасада горизонтальны, то проведенные через них прямые линии сойдутся в точке схода, расположенной на линии горизонта.

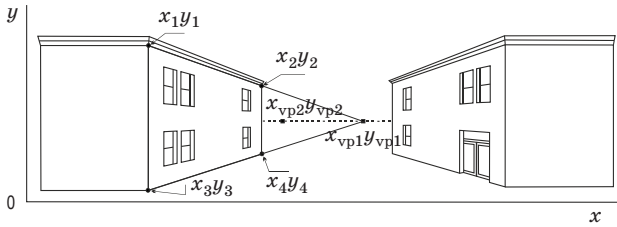


Рис. 2. К пояснению определения линии горизонта.

Координаты точки схода найдем, составив и решив уравнения этих прямых. Уравнение для верхней линии схода запишется в виде

$$y = a_{vp1}(x - x_1) + b_{vp1}, \quad (7)$$

где a_{vp1} и b_{vp1} – коэффициенты, равные

$$a_{vp1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad b_{vp1} = y_1.$$

Аналогично для нижней линии схода будем иметь

$$y = a_{vp2}(x - x_3) + b_{vp2}, \quad (8)$$

где a_{vp2} и b_{vp2} – коэффициенты, равные

$$a_{vp2} = \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3}, \quad b_{vp2} = y_3.$$

В результате решения уравнений (7) и (8) получим

$$x_{vp1} = \frac{a_{vp1}x_1 - a_{vp2}x_3 + b_{vp2} - b_{vp1}}{a_{vp1} - a_{vp2}},$$

$$y_{vp1} = a_{vp1} \frac{a_{vp2}(x_1 - x_3) + b_{vp2} - b_{vp1}}{a_{vp1} - a_{vp2}} + b_{vp1}.$$

Для определения второй точки схода проведем еще две линии схода через горизонтальные границы фасада второго здания. Выполняя аналогичные вычисления, найдем координаты второй точки схода x_{vp2} , y_{vp2} . Прямая, проходящая через эти точки (на рисунке она показана пунктирной линией), будет линией горизонта, потому что все рассмотренные линии схода лежат в плоскостях, параллельных горизонтальной плоскости.

Описанный способ позволяет также определить угол наклона плоской поверхности, на которой располагаются здания. С этой целью линии схода следует провести по нижним границам зданий параллельно поверхности, на ко-

торой они расположены. Если эта поверхность восходящая, точка схода окажется выше линии горизонта, если нисходящая, то ниже нее.

Метод получения 3D-изображения объекта по его 2D-изображению

Поясним метод на примере простого объекта, который представляет собой два соединенных прямоугольных рекламных щита, расположенных под углом друг к другу. С этой целью обратимся к рис. 3. На рис. 3а представлен вид на объект спереди, а на рис. 3б – вид сверху. Будем считать, что вертикальные линии прямоугольных щитов параллельны плоскости проецирования, а горизонтальные составляют угол 45° с направлением главного луча. Обозначим через L_1 расстояние между ближайшей точкой объекта и центром объектива, фокусное расстояние которого равно f . Метод включает в себя следующие этапы.

1. Декомпозиция изображения объекта и его аппроксимация двумя плоскостями так, как это показано на рис. 3в.

2. Изображение каждой аппроксимирующей плоскости пересчитывается от центральной проекции к аксонометрической проекции. На рис. 3г приведена левая граница правого щита, которая больше его правой границы, т.е. $(y_1 - y_3) > (y_2 - y_4)$, хотя на объекте эти расстояния одинаковы. Такое искажение размеров обусловлено тем, что правая граница расположена дальше от камеры, чем левая. Для оценки перспективных искажений введем коэффициент K , который определяется как отношение вертикального размера центральной проекции прямоугольника (в рассматриваемом примере щита) при заданном значении координаты x к вертикальному размеру проекции его ближайшей к камере вертикальной границы. При $x = x_2$ коэффициент принимает минимальное значение

$$K_{\min} = (y_2 - y_4) / (y_1 - y_3).$$

Из рис. 3в также следует, что коэффициент искажений K линейно изменяется с изменением координаты x

$$K = K_{\min} - (K_{\min} - 1) \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}.$$

В такой же мере наблюдается искажение и горизонтальных размеров щита, хотя на рассматриваемом рисунке это сразу не бросается

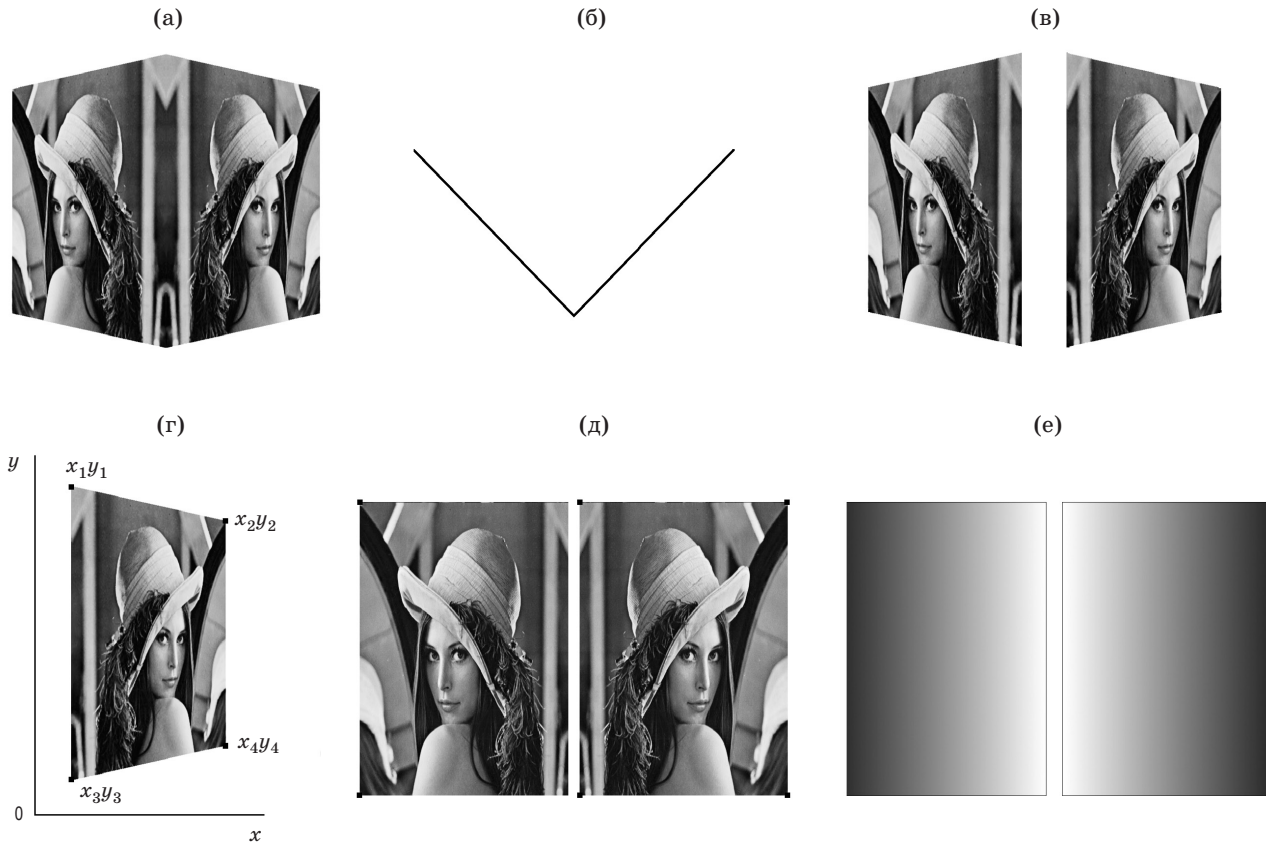


Рис. 3. К пояснению принципа формирования 3D-изображения объекта по его двумерной фотографии.

в глаза. При этом координаты каждой точки аксонометрической проекции объекта x_{iso} и y_{iso} рассчитываются по формулам

$$x_{\text{iso}} = x_1 + (x - x_1)/K, \quad y_{\text{iso}} = y_0 + (y - y_0)/K, \quad (9)$$

где $y_0 = (y_1 + y_3) / 2$.

Так как масштаб полученной аксонометрической проекции определяется расстоянием от центра объектива камеры до объекта, то координаты соответствующих точек объекта x_{ob0} и y_{ob0} находятся путем деления координат x_{iso} и y_{iso} на масштабирующий множитель f/L_1 . Аналогичным образом находится аксонометрическая проекция левой аппроксимирующей плоскости. На рис. 3д приведены обе аппроксимирующие плоскости в аксонометрической проекции.

3. Для каждой аппроксимирующей плоскости определяется расстояние по глубине z_0 между ее вертикальными границами по формуле (5).

4. Определяется координата глубины каждой точки аппроксимирующих плоскостей, т.е. рассчитывается карта глубины. Для этого

сначала путем линейной интерполяции находят координаты глубины точек, расположенных на горизонтальных линиях, соединяющих вершины аппроксимирующих плоскостей, координаты глубины которых уже определены. В данном случае линейная интерполяция допустима, так как шкала “дальности” при аксонометрической проекции равномерная. После этого путем линейной интерполяции находят координаты глубины всех остальных точек аппроксимирующих плоскостей. На рис. 3е приведены карты глубины каждой из аппроксимирующих плоскостей, где более светлый тон соответствует точкам, расположенным ближе к центру объектива, а более темный – точкам, удаленным на большие расстояния.

5. “Сборка” объекта посредством объединения аппроксимирующих плоскостей.

В зависимости от сложности изображения количество аппроксимирующих плоскостей может потребоваться и большее, чем в рассмотренном примере. На рис. 4 приведены изображения, для аппроксимации которых потребовались 3 и 5 плоскостей соответственно.



Рис. 4. Примеры двух изображений объектов, для аппроксимации которых необходимо использовать 3 (а) и 5 (б) плоскостей соответственно.

АксонOMETрическая проекция и карта глубины содержат полную информацию о видимой части 3D-объекта и поэтому позволяют выводить на экран его изображение для рассмотрения при различных ракурсах и с различных расстояний наблюдения. Для получения полного 3D-изображения объекта, а не только его видимой части, так же как и в случае традиционных 3D-сканеров, возникает необходимость в склейках отдельных частей 3D-изображения, полученных при различных ракурсах съемки объекта. Представление 3D-изображения в виде аксонометрической проекции и карты глубины, так называемый 2D+Z-формат, применяется в 3D-телевидении. Этот формат может быть преобразован в другие форматы 3D-изображений.

Отображение 3D-изображения на экране дисплея

Рассмотрим отображение 3D-изображения объекта на экран дисплея при заданном ракурсе и расстоянии наблюдения, используя в качестве исходных данных его аксонометрическую проекцию, карту глубины, а также расстояние, с которого выполнялось фотографирование L_1 , и фокусное расстояние объектива f . Сначала определим координаты точек видимой части объекта, затем повернем объект, чтобы обеспечить требуемый ракурс наблюдения, и наконец, рассчитаем перспективную проекцию объекта, наблюдаемого с заданного расстояния.

Как уже отмечалось, декартовы координаты произвольной точки видимой части поверхности объекта x_{ob0} , y_{ob0} в его исходном положении находятся путем деления координат его аксонометрической проекции x_{iso} и y_{iso} на масштабированный множитель f/L_1

$$x_{ob0} = x_{iso} L_1 / f, \quad y_{ob0} = y_{iso} L_1 / f. \quad (10)$$

Координата же z_{ob0} берется из карты глубины. Переходя к повороту объекта вокруг координатных осей в целях обеспечения требуемого ракурса наблюдения, заметим, что его поворот вокруг оси z интереса не представляет, поскольку не приводит к изменению ракурса наблюдения. Поэтому рассмотрим его повороты только вокруг осей x и y , для чего выберем точку на поверхности объекта с координатами x_{ob0} , y_{ob0} , z_{ob0} и последовательно повернем его сначала на угол α вокруг оси y , а затем на угол β вокруг оси x . Поворачивая объект на угол α , найдем новые координаты этой точки x_{ob1} , y_{ob1} , z_{ob1}

$$x_{ob1} = x_{ob0} \cos \alpha - z_{ob0} \sin \alpha, \quad y_{ob1} = y_{ob0},$$

$$z_{ob1} = z_{ob0} \cos \alpha + x_{ob0} \sin \alpha. \quad (11)$$

Поворачивая затем объект на угол β вокруг оси x , получим координаты рассматриваемой точки x_{ob2} , y_{ob2} , z_{ob2} для этого случая

$$x_{ob2} = x_{ob1}, \quad y_{ob2} = y_{ob1} \cos \beta - z_{ob1} \sin \beta,$$

$$z_{ob2} = y_{ob1} \sin \beta + z_{ob1} \cos \beta. \quad (12)$$

Обратим внимание на то, что допустимые значения α и β ограничиваются значениями, при которых изображения повернутого 3D-объекта еще не включают в себя фрагментов, заслоняемых самим объектом при фотографировании. Подставляя x_{ob1} , y_{ob1} , z_{ob1} из уравнения (11) в (12), получим

$$x_{ob2} = x_{ob0} \cos \alpha - z_{ob0} \sin \alpha,$$

$$y_{ob2} = y_{ob0} \cos \beta - z_{ob0} \cos \alpha \sin \beta - x_{ob0} \sin \alpha \sin \beta, \quad (13)$$

$$z_{ob2} = y_{ob0} \sin \beta + z_{ob0} \cos \alpha \cos \beta + x_{ob0} \sin \alpha \cos \beta.$$

Заключительным этапом вычислений является расчет декартовых координат каждой точки центральной проекции объекта по соотношениям, аналогичным формулам (4)

$$x_{pr} = x_{ob2} \frac{f}{L_1 + z_d}, \quad y_{pr} = y_{ob2} \frac{f}{L_1 + z_d}, \quad (14)$$

где z_d – расстояние от ближайшей к центру объектива точки объекта до точки объекта, для которой выполняется расчет (это расстояние

определяется из карты глубины), а L_1 – расстояние от точки объекта, ближайшей к центру объектива, до центра объектива. На рис. 5 приведены 3D-изображения, полученные в результате обработки изображений, представленных на рис. 4.

Вывод стереоскопического 3D-изображения на экран дисплея

При наблюдении 3D-объекта на сетчатку правого и левого глаз зрителя проецируются несколько различающиеся между собой изображения. Это различие обусловлено тем, что оптические оси глаз разнесены в пространстве на расстояние базы b , которая у человека составляет около 65 мм, вследствие чего правый и левый глаз видят объект с разных точек. В результате этого наблюдатель зрительно как бы охватывает объект. Это явление называется стереоскопическим эффектом, который проявляется только при сравнительно небольших расстояниях наблюдения. Стереоскопический

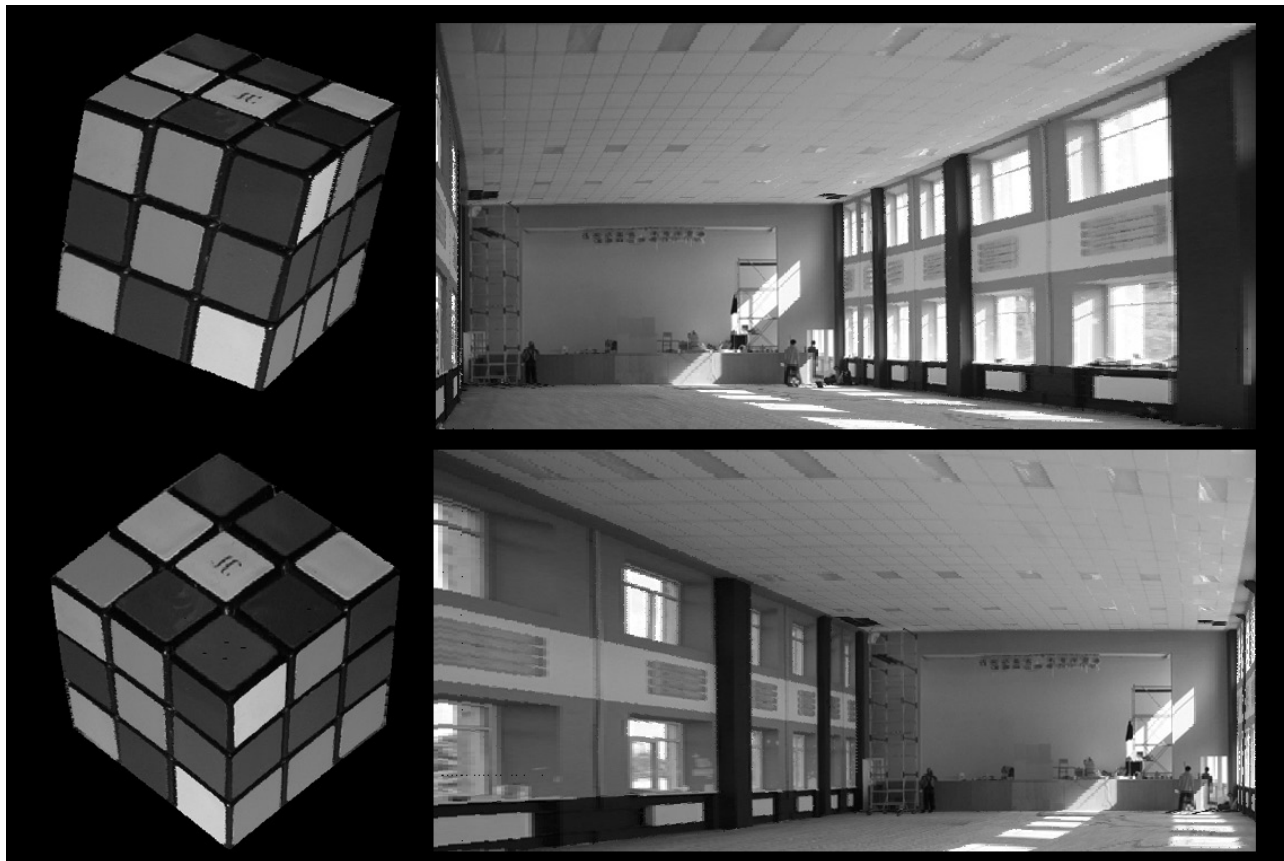


Рис. 5. Примеры проекций 3D-изображений, полученных с использованием описанного метода обработки двумерных изображений.

эффект может быть также получен, если правому и левому глазу предъявить для наблюдения два изображения объекта, сфотографированного с двух точек, смещенных по горизонтали на расстояние базы. Такие изображения составляют так называемую стереопару. Эти изображения также могут быть сформированы из 3D-изображения объекта. В последнем случае необходимо получить две проекции 3D-объекта для правого и левого глаза при заданном расстоянии между ближайшей точкой объекта и точкой, расположенной в середине отрезка прямой, соединяющего зрачки глаз, L_1 . С этой целью сперва определяется угол между оптическими осями глаз, так называемый угол конвергенции α_c , исходя из очевидного уравнения

$$b/2L_1 = \operatorname{tg} \alpha_c / 2,$$

решая которое относительно α_c , получим

$$\alpha_c = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{b}{2L_1} \right).$$

Далее для формирования изображений, составляющих стереопару, в формулы (13) необходимо вместо угла α подставить соответствующие значения

$$\alpha_R = \alpha - \alpha_c / 2, \quad \alpha_L = \alpha + \alpha_c / 2$$

и продолжить расчет по формулам (14). Полученные таким образом изображения могут демонстрироваться любым известным методом. Поскольку наиболее доступным, но не лучшим в смысле воспроизведения цвета, является анаглифный метод, так как анаглифные очки можно легко приобрести, и они крайне дешевы, то для иллюстрации был использован именно этот метод. На сайте [7] помещены исходные 2D-изображения и полученные из них описанным методом стереоскопические изображения 3D-сцен.

В завершение описания метода остановимся на способах определения ракурса съемки, фокусного расстояния объектива и расстояния, с которого проводилось фотографирование. Эти параметры необходимо знать, чтобы, следуя рассмотренному методу, из 2D-изображения сначала получить 3D-изображение, а затем стереоскопическое 3D-изображение.

Здесь возможны два случая. В первом случае, когда из 2D-изображения требуется получить документально точное 3D-изображение, ракурс съемки, фокусное расстояние объектива и расстояние, с которого проводилось фото-

графирование, необходимо измерять непосредственно при фотографировании.

В том случае, когда в качестве исходного материала имеется уже готовая фотография, полученная при неизвестных условиях фотографирования, единственным способом остается метод подбора этих параметров с последующей зрительной оценкой получаемых результатов. Конечно, при этом говорить о степени точности воспроизведения не представляется возможным. Однако благодаря тому, что в поле зрения объектива попадают более или менее знакомые оператору объекты (окна и двери зданий, деревья, автомобили, ступеньки лестниц и др.), форма и размеры которых приблизительно известны, конечные результаты получаются весьма неплохими. Иллюстрацией сказанного может служить рис. 5, на котором представлены два 3D-изображения кубика и два 3D-изображения зала. Изображения кубика получены при использовании заранее измеренных параметров, определяющих условия фотографирования, в то время как изображения зала рассчитывались с использованием метода подбора этих параметров. На сайте [7] в Приложениях 1 и 3 приведены стереоскопические изображения, полученные из 2D-изображений при заранее измеренных параметрах фотографирования, а в Приложениях 2 и 4 – стереоскопические изображения, полученные из 2D-изображений, при расчете которых параметры, определяющие условия фотографирования, находились методом подбора.

Заключение

Рассмотренный метод конвертации создает 3D-изображения объектов и сцен в виде комплекта, состоящего из их аксонометрических проекций и карт глубины. Поскольку количество аппроксимирующих плоскостей много меньше количества пикселей в аксонометрической проекции, то при сжатии без потерь карта глубины лишь незначительно увеличивает результирующий цифровой поток, который в основном определяется аксонометрическими проекциями. Так при сжатии 3D-изображения, полученного из изображения, приведенного на рис. 4б, посредством архиватора 7z оказалось, что на карту глубины приходится менее 1,2% от полного цифрового потока, представляющего 3D-изображение. Из изложенного следует, что описанный метод представления

3D-изображений хорошо согласуется с принципами совместимости современных систем телевидения, не создавая проблем в отношении увеличения результирующего цифрового потока [2].

Метод позволяет также, используя недорогую цифровую камеру, получать 3D-изобра-

жения объектов, допускающих аппроксимацию плоскостями, вместо использования дорогих лазерных сканеров. Кроме того, его можно использовать как элемент алгоритма для реализации функции преобразования 2D-изображений в стереоскопические изображения в современных телевизорах [5].

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Порев В.Н.* Компьютерная графика. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 432 с.
2. *Красильников Н.Н.* Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 608 с.
3. *Красильников Н.Н., Красильникова О.И.* Определение координаты глубины по 2D-изображению // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 12. С. 30–33.
4. *Красильников Н.Н., Красильникова О.И.* Получение трехмерного изображения объекта путем измерения интенсивности диффузного отражения света различными точками его поверхности // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 6. С. 19–24.
5. http://3dtv-obzor.ru/2d_3d_convertacia
6. *Красильников Н.Н.* Метод формирования 3D-изображения сцены по одной фотографии // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С. 2–7.
7. <http://download.guap.ru/public/krasilnilov/>