

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объемные компьютерные копии объектов

А.А. Веденов

Сегодня ученый может создавать с помощью персонального компьютера объемные (3D) копии объектов — своеобразные "базы данных", не только содержащие полные пространственные координаты и цвета всех точек объекта, но и позволяющие взглянуть на него "с птичьего полета", выявляя характерные черты объекта как целого и позволяя провести их наименование. Приведены примеры 3D-копий, обсуждаются принципы их создания и наблюдения.

PACS numbers: 42.65.P

Содержание

1. Введение (967).
 2. Стереоизображения (968).
 3. Стереоскопы (969).
 4. Стереооткрытки, интегральная фотография и голограмма (972).
 5. Фотостереоалгоритм (973).
 6. Нахождение пространственных координат (974).
 7. Примеры (974).
 8. Восстановление трехмерной сцены по стереоизображению (976).
 9. Заключение (977).
- Список литературы (978).

Я, откровенно говоря, не люблю последних новостей по радио... Мой глобус гораздо удобнее... Если Вы приблизите глаза, Вы увидите и детали...
М.А. Булгаков "Мастер и Маргарита"

1. Введение

Сегодня с помощью персонального компьютера можно создавать объемные (3-dimensional, или 3D) компьютерные копии объектов с возможностью рассматривать эти копии в разных ракурсах и с разного расстояния с помощью всех известных методов индивидуального и коллективного стереовидения, а также с помощью стандартных современных методов 3D-визуализации.

В процессе конструирования 3D-компьютерной копии можно использовать результаты различных физических измерений объекта или его фотографии.

Персональный компьютер позволяет использовать глубокие знания специалиста о трехмерных объектах в его области исследований (мысленное представление объекта, которое крайне трудно формализовать) для интерпретации результатов измерений или для рекон-

А.А. Веденов. Российский научный центр "Курчатовский институт", 123182, Москва, пл. Курчатова, 46

Статья поступила 19 мая 1994 г.

струкции обычной плоской "копии" объекта — его фотографического изображения (оптической, электронной, рентгеновской, инфракрасной фотографии). Такая фотография представляет собой, по сути, весьма искаженную копию, сжатую в одном измерении — по глубине, а ее реконструкция приводит к созданию истинно трехмерной копии объекта.

Трехмерный объект может быть совокупностью точек, линий или поверхностей в пространстве; сами линии и поверхности также состоят из точек. Точки окрашены; в современных персональных компьютерах цвет точки характеризуется интенсивностью красного, зеленого и синего цветов (red, green, blue, или RGB), которая для каждого из цветов может принимать одно из целочисленных значений от 0 до 255.

После того, как 3D-объект в компьютере создан, возникает вопрос — как его рассматривать?

Конечно, в ближайшие годы следует ожидать появление "стеклообразной" (аэрогель или другое прозрачное вещество) среды для визуализации объемной модели с адресным доступом к произвольной точке объема и возможностью включения в этой точке цвета, произвольной комбинации RGB-палитры. Однако плоский носитель изображения (бумага, фотопленка, плоский экран) останется привычным и во многих случаях более удобным.

В некоторых случаях для адекватного восприятия объема достаточно воспроизвести одно из стандартных плоских изображений трехмерного объекта. В качестве примера приведем схематическое изображение Вселенной в виде набора "слоев" кубиков различной окраски, так что цвет кубика однозначно соответствует средней (в данном кубике) объемной плотности галактик (см. рис. 5). Однако для представления полных данных о пространственном расположении галактик, составляющих Вселенную, плоского изображения уже недостаточно — необходимо стереоизображение (см. рис. 6).

Сегодня простейший способ наблюдать 3D-компьютерную копию объекта — это изготовить стереослайд (или стереоизображение в какой-либо иной форме) этого объекта и воспользоваться одним из приборов

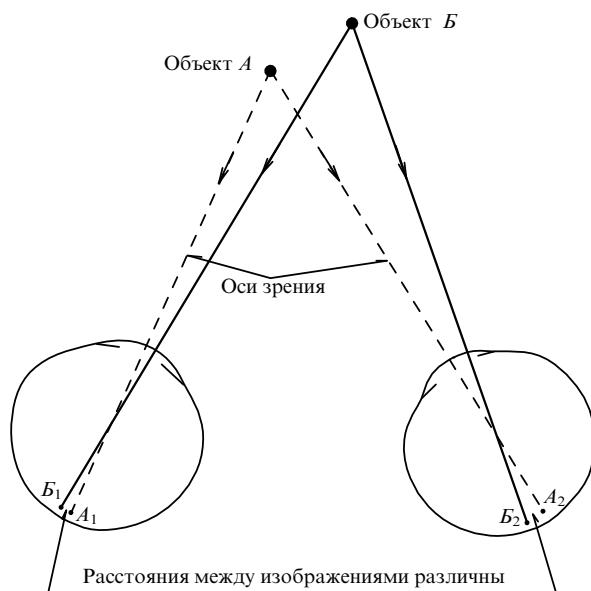


Рис. 1. Сетчаточная диспаратность

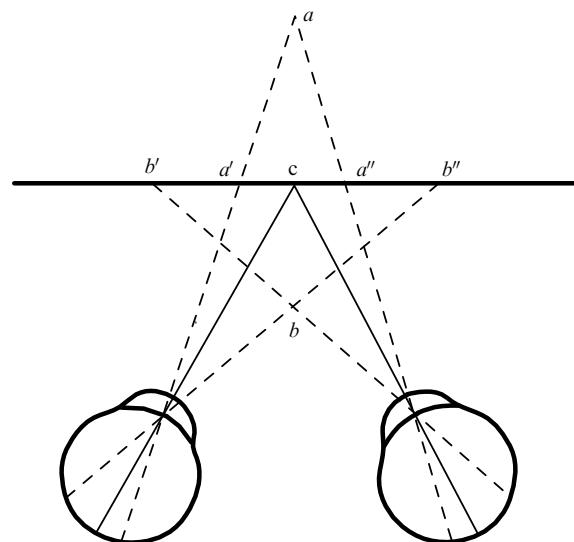


Рис. 2. Опыт с двумя спицами

индивидуального или коллективного просмотра стереослайдов.

2. Стереоизображения

Слово стереоскоп состоит из греческих стерео — объемный, телесный — и скопо — смотрю. Стереопара — это два изображения одного и того же предмета, рассматривая которые одновременно с помощью стереоскопа (а при определенном навыке и без всякого приспособления), получаешь ощущение такой же глубины изображения, как и при наблюдении самого реального предмета.

Эта проблема — увидеть запечатленную неискаженную копию кусочка трехмерного мира — возникла, по сути дела, потому, что любая форма фотографии в соответствии с законами преломления света (или других — электронных, рентгеновских — лучей) создает в фоточувствительном материале "копию" трехмерного объекта, крайне искаженную, сильно сжатую по глубине.

Одно из решений этой проблемы и состоит в использовании стереоизображений: стереофотографий, стереоскопических электронных микрофотографий в сканирующем микроскопе и т.п. (голография, по существу, является одним из вариантов стереоскопии и решает ту же задачу: увидеть копию объекта или сцены, запечатленную в фоточувствительном слое, как истинную копию реального объекта или сцены [8]).

Нетрудно самому изготовить простейшую стереопару. Чтобы получить, например, стереоизображение прозрачного конуса, достаточно на белом листе плотной бумаги (размером 9,5 см × 7 см) дважды обвести карандашом монету, расположив центры кружков на расстоянии 6 см друг от друга и на высоте 2,5 см над нижним краем листка бумаги. Отметив далее карандашом две точки, смещенные, соответственно, вправо и влево от левого и правого центров кружков на 1 мм (так, чтобы расстояние между ними составило 5,8 мм), и рассматривая листок в стандартный стереоскоп, мы увидим прозрачный конус: круглый ободок основания и приближенную к нам вершину. Если стереопара изгото-

влена на непрозрачной бумаге, рассматривать ее нужно в рассеянном свете, проникающем в щель спектроскопа; чтобы можно было рассматривать стереопару напрямую, нужно нарисовать ее на кальке либо кусочке пергамента.

Если, наоборот, раздвинуть эти две точки так, чтобы расстояние между ними составило 6,2 мм, то при рассматривании стереопары мы увидим прозрачный конус с удаленной от нас вершиной.

Опыт показывает, что многие люди видят единое объемное изображение, рассматривая стереопару и без всякого стереоскопа.

Построим еще несколько простых стереопар, которые можно рассматривать в стандартный стереоскоп. Например, наклоненный в глубину отрезок мы получим, соединив вершины конусов предыдущего примера на правой и левой половинах стереопары с одним из концов (скажем, верхним) вертикальных диаметров кружков. Усеченную пирамиду можно построить, сместив вправо и влево маленькие квадраты внутри больших. Лежащую на плоскости прямоугольную коробку можно увидеть, сместив вправо и влево квадраты, изображающие заднюю стенку коробки, относительно "передней стенки". Наконец, построив несколько наклоненных в пространстве отрезков таких, что конец одного является началом следующего, можно сконструировать пространственную ломаную линию и даже "заязвать ее узлом".

Что такое стереоскопическое зрение? Когда человек смотрит на расположенный перед ним небольшой объект A , говорят, что наблюдатель "фиксирует предмет". Лучи, проходящие от A через хрусталики глаз и попадающие на сетчатку глаз, фокусируются на ней в областях A_1 и A_2 (рис. 1). В сознании наблюдателя два образа объекта A (воспринимаемые правым и левым глазами) "сливаются" в единый образ. При этом угол между "осами зрения" $A - A_1$ и $A - A_2$ (угол конвергенции) и разность смещений изображений A_1 и A_2 относительно центров сетчаток (диспаратность) служат мерой представления наблюдателя об удаленности предмета A .

Лучи от второго объекта B фокусируются на сетчатке в областях B_1 и B_2 , угол конвергенции и диспаратность принимают другие значения, и наблюдатель воспринимает объект B как удаленный на иное, чем объект A , расстояние. Если наблюдатель осознает, что объекты A и B принадлежат одному предмету, то возникает естественное ощущение протяженности этого предмета в глубину.

Исследования зрения человека (и животных) показали, что для восприятия глубины важны два явления — аккомодация и конвергенция. Аккомодация глаза — это его "приспособление к отчетливому видению предметов на различных расстояниях; при помощи глазных мышц хрусталик глаза изменяет свою форму так, что предмет дает отчетливое изображение на сетчатке" [9].

"Видение предметов близких заставляет глаз аккомодировать сильнее, чем это необходимо для фиксации точек, более удаленных. На основании различия в напряжении аккомодации глаза можно видеть и оценивать удаленность различных объектов и при помощи монокулярного зрения. Однако оценка расстояния при монокулярном зрении очень несовершенная и ограничена. Для точек, удаленных больше, чем на 6–8 м, глаз уже не аккомодирует вовсе. Поэтому возможность видеть и тонко оценивать большую или меньшую удаленность предметов и их частей основывается по преимуществу на зрении бинокулярном (зрении двумя глазами). При бинокулярном зрении, кроме аккомодации, видению рельефа способствуют конвергенционные движения и несоответствие изображений на обеих сетчатках. Под конвергенционными движениями понимаются движения сведения зрительных осей обоих глаз на фиксируемом объекте. Несоответствие сетчаточных изображений обуславливается тем, что один глаз отстоит от другого на некотором расстоянии (около 60 мм) и поэтому видит объект с несколько другой точки зрения" [9].

Однако "конвергенция, как и аккомодация, в стереоскопическом видении решающей роли не играет. Последнее доказывается известным опытом Геринга с оценкой удаленности падающего шарика. Через трубу, закрывающую от нас всю окружающую обстановку, мы фиксируем обоими глазами некоторую точку (например, подвешенный на нити меловой шарик); в это время лицо, производящее опыт, бросает другой белый шарик впереди или позади фиксируемой точки. Поскольку мы смотрим бинокулярно, нам не представляется труда правильно оценить, упал ли шарик впереди, или позади фиксируемой точки. Между тем время падения шарика меньше, чем то, которое требуется на произведение аккомодационных или конвергенционных движений. Следовательно, наша оценка удаленности может совершаться хорошо и без их участия" [9].

Одним из основных факторов в стереоскопическом видении является несоответствие изображений на сетчатках двух глаз. "Однако не всякое несоответствие изображений, возникающих на сетчатках, влечет за собой впечатление стереоскопичности объекта. Если это несоответствие слишком велико или если точка предмета, дающая в одном глазу изображение на левой половине сетчатки, в другом глазу дает изображение на правой ее половине, мы получаем впечатление двойственности, видим эту точку двойной. Возьмем две спицы и поставим их одну за другой на расстоянии примерно 15 см друг от

друга. Будем при этом фиксировать ближнюю спицу, находящуюся в точке c (рис. 2), тогда дальняя (находящаяся в точке a) увидится нами уже двойной в точках a' и a'' . При фиксировании же более удаленной спицы (в точке c) раздвоится более близкая (помещенная в точку b) и даст в свою очередь два изображения b' и b'' . Как можно видеть из рис. 2, в обоих случаях изображение нефиксированной спицы падает на разноименные половины сетчаток.

Если же несоответствие не слишком велико или же оно односторонне (т.е. раздраженные несоответствующие точки сетчатки в обоих глазах лежат в правых половинах сетчаток или в обоих глазах — в левых половинах), двоения не получается, но получается впечатление третьего измерения, близости или удаленности предмета сравнительно с фиксируемой точкой.

Степень и направление видимой удаленности предмета зависят при этом от так называемого относительного бинокулярного параллакса" [9].

Бинокулярный параллакс p видимой точки A равен углу A_1-A-A_2 (см. рис. 1), и при малых значениях $p \ll 1$

$$p = \frac{d}{l}, \quad (1)$$

где d — расстояние между зрачками глаз, l — расстояние до точки A . Относительный бинокулярный параллакс dp двух точек A и B равен

$$dp = d \frac{dl}{l^2}, \quad (2)$$

где dl — разница удаленностей точек A и B . "Если разность углов, составленных в обоих глазах линией фиксации и направлением, идущим от данной (не фиксируемой) точки через узловую точку глаза, дает угол, лежащий на височной половине сетчатки, мы видим данную точку расположенной ближе, чем фиксируемая. Если же эта разность дает угол, лежащий в носовой половине сетчатки, точка кажется дальше фиксируемой" [9].

Как и для других органов чувств человека (например, осязания или слуха) для различия двух точек по удаленности имеется порог; обычно пороговая величина углового параллакса составляет 5–10 угловых секунд. Этому пороговому значению соответствует предельная дальность, так называемый радиус стереоскопического видения, за которым глаз уже не в состоянии воспринять различий рельефа. В соответствии с формулой (1) величина радиуса стереоскопического видения у разных людей составляет 1–1,5 км.

3. Стереоскопы

По-видимому, стереоскоп был изобретен около 1830 г., еще до первых "дагерротипов" (1839 г.). "В первых стереоскопах до изобретения фотографии помещались только чертежи геометрических тел и несложные перспективные рисунки" [10]. Описание различных типов стереоскопов, применявшихся в прошлые годы, можно найти, например, в [1].

В России в начале века выпускались высококачественные стереофотографии (в частности, учебные пособия по географии и зоологии), которые обычно рассматривали в стереоскоп-лорнет.

В настоящее время в России и за рубежом имеется ряд стереоскопов. Эти стереоскопы используются для рас-

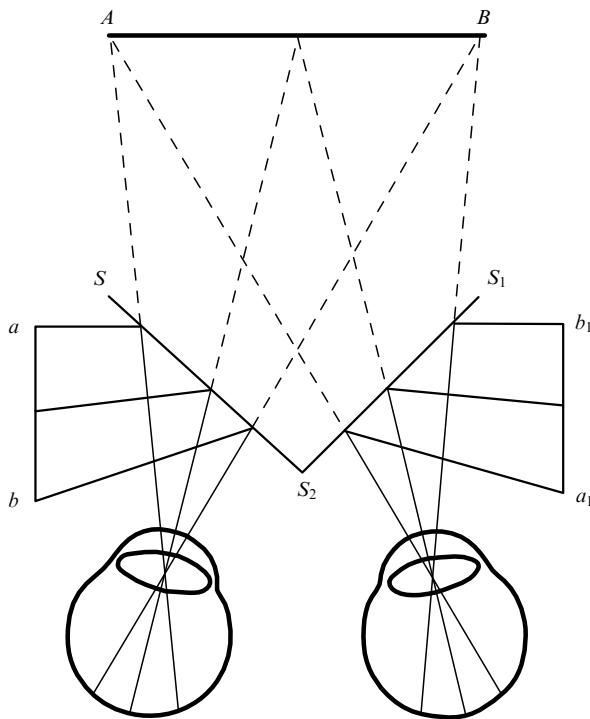


Рис. 3. Стереоскоп Уитстона

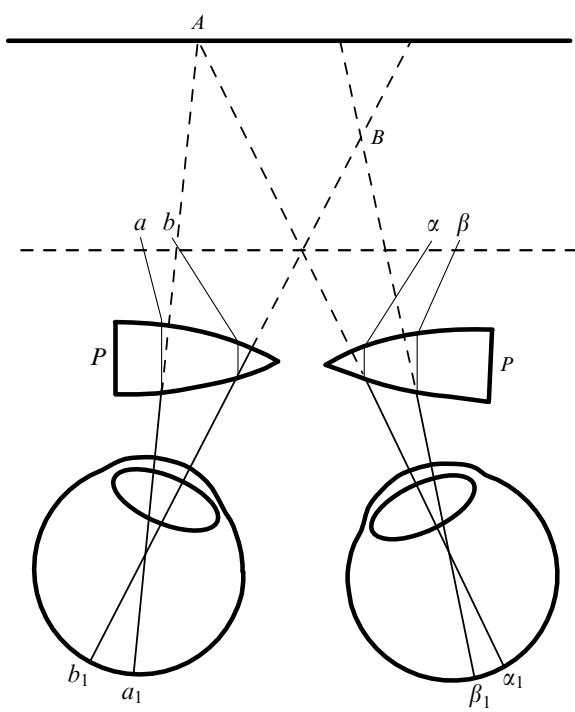


Рис. 4. Стереоскоп Брюстера

сматривания стереослайдов, изготовленных на цветной фотопленке при стереофотосъемке видов природы, городов, памятников архитектуры, игрушечных макетов сказок, макетов технических устройств и т.п.

Стереоскопия также используется в различных областях науки (см. список приложений в разделе 8).

Стереоскоп устроен так, что при рассматривании в него каждый глаз видит только одну из двух половин стереопары. Если эти картинки соответствуют тому, что видно каждым глазом при рассматривании реального предмета, у наблюдателя возникает ощущение, что он видит реальный, протяженный в глубину объект.

"Первый стереоскоп изобретен Уитстоном в 1833 г. Он представляет собой два зеркала, стоящие под углом друг к другу (рис. 3). Перед одним из них ставится изображение предмета в той проекции, как он видится только левым глазом; перед другим ставится изображение, соответствующее тому, как этот же предмет виден правому глазу. Первое изображение, отражаясь от зеркала, попадает в левый глаз смотрящего, второе — в его правый глаз. Путем некоторых передвижек изображений перед зеркалами добиваются того, чтобы центральные места изображений упали бы в обоих глазах на соответственные точки сетчаток. В таком случае одностороннее несоответствие изображений прочих частей предмета вызовет у нас впечатление рельефа. В А — В мы и увидим одно стереоскопическое изображение предмета, представленного в а — б и а₁ — б₁.

Весьма распространен стереоскоп Брюстера (рис. 4). Две карточки, соответствующие проекции предмета для левого и для правого глаза, помещаются в а — б и α — β, рассматриваются обоими глазами через линзы Р и дают стереоскопическое изображение в А — В" [9].

Стереолорнет представляет собой два стекла для очков (примерно +6 диоптрий, т.е. фокусное расстояние

около 16 см), укрепленные на рукоятке так, что, поворачивая оправки стекол вокруг точки крепления к рукоятке, можно менять расстояние между центрами стекол, подбирая наиболее удобное.

Еще в прошлом веке для топографических целей и в военном деле использовался телеостероископ Гельмгольца — "прибор, предназначенный для определения, какие из дальних предметов находятся впереди других. Перед глазными трубочками находятся два зеркальца...; на одной линии с ними направо и налево помещены другие два зеркальца, отражающие изображения предметов в первые зеркальца. В каждом из глаз составится изображение удаленных предметов, и если линейка, на концах которой укреплены крайние зеркальца, имеет 1,5–2 метра длины, то можно судить о том, например, какая из вершин холмов, рисующихся рядом, ближе к наблюдателю" [10].

При этом, однако, "рельеф будет усиленный и может перейти в безобразный для предметов, близких к глазу" [10].

"Увеличить радиус нашего стереоскопического зрения и вообще повысить остроту различения нами рельефа мы могли бы путем увеличения относительного бинокулярного параллакса, соответствующего данным точкам предмета, которые мы хотим стереоскопически различать. По приведенной выше формуле (2), увеличив как-либо межзрачковое расстояние d , мы увеличили бы и dp . Это и достигается в так называемом телестереоскопе Гельмгольца" [9].

"При увеличении базы B радиус [стереоскопического зрения] увеличивается как отношение расстояния B между объективами прибора к расстоянию d между глазами. Это отношение B/d называется удельной пластикой прибора. При введении в прибор еще и увеличения w увеличиваются в w раз и предел глазного

параллакса (10 угловых секунд) и полная пластика прибора". Обычно в фокальных плоскостях стереоскопических дальномеров "помещены стереоскопические снимки с ряда вех, находящихся на определенных расстояниях от наблюдателя. Смотря в прибор, увидим, что вехи как бы уходят в глубь пространства, и сможем оценить удаление точек обозреваемого ландшафта в зависимости от того, близ которой из вех они придутся" [11].

В наше время приборы такого типа (называемые сейчас гиперскопами) используются для изучения восприятия человеком трехмерного пространства. "Увеличение эффективного расстояния между глазами приводит к увеличению сетчаточной диспаритетности — различия в положениях изображений на сетчатках — и разности углов конвергенции, соответствующих рассматриванию разноудаленных предметов. Предположим, вы смотрите на предмет *A* через гиперскоп так, что предмет *B* также находится в поле зрения. Новое различие в положениях предметов на сетчатках принуждает вас считать, что расстояние между предметами по глубине стало больше. Кроме того, вы воспринимаете большую глубину потому, что стала больше разница и в углах конвергенции.

Гиперскоп изменяет также видимую высоту и ширину соседних предметов. При нормальных условиях зрения человек привыкает к определенному соотношению между размером изображения предмета на сетчатке и расстоянием до предмета. При наблюдении в гиперскоп предмет кажется уменьшившимся, поскольку угол конвергенции, необходимый для рассматривания его через зеркала, больше нормального значения.

Многие знакомые предметы приобретают странные очертания, если рассматривать их в гиперскоп. Например, человеческое лицо утонается, а нос выступает вперед. Все предметы сразу же принимают свой нормальный вид, когда вы закрываете один глаз и смотрите в прибор другим глазом. В этом случае вы уже не в состоянии оценивать сетчаточную диспаритетность или углы конвергенции и воспринимаете глубину пространства лишь на основе признаков картиности" [6].

Эти эффекты, наблюдаемые при рассматривании в гиперскоп реальных объектов и сцен, можно видеть и в

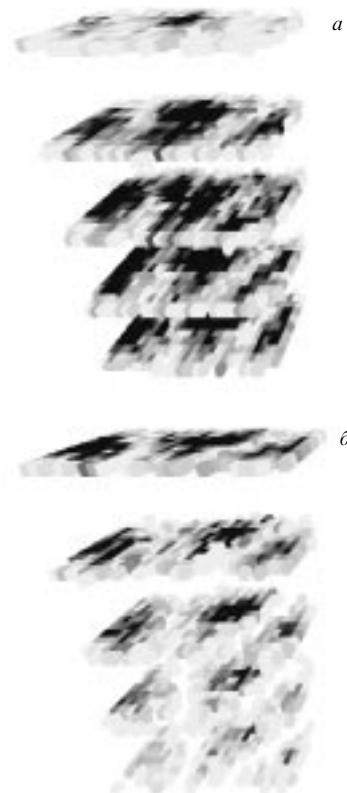


Рис. 5. Вселенная. *а* — Ближние 5 слоев. *б* — Дальние 5 слоев

стереоскопе, рассматривая стереопары, снятые фотографом при расстоянии между объективами, превышающем расстояние между глазами человека.

Если стереоизображение объекта не цветное, а черно-белое или полутоновое серое, то для получения эффекта объема можно окрасить правую половину стереоизображения в красный цвет, а левую — в зеленый и смотреть одновременно на обе половины стереопары, используя очки с правым красным и левым зеленым светофильтром. Вместо экрана компьютера или телевизора можно использовать белый бумажный экран, проецируя на него красно-зеленое стереоизображение, или белый лист

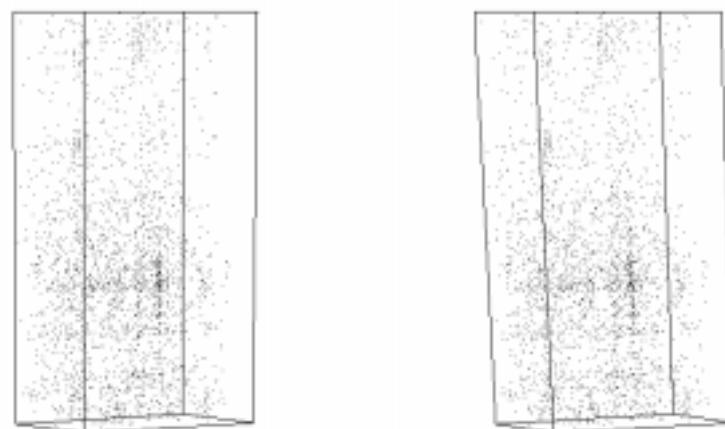


Рис. 6. 1/8 Вселенной

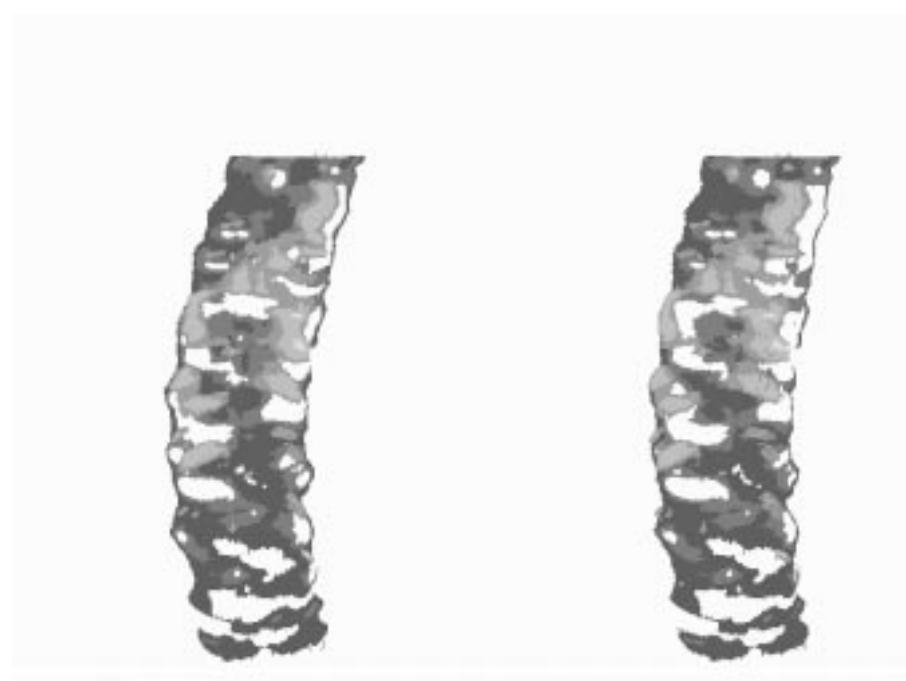


Рис. 7. Винтовая неустойчивость плазмы

бумаги, напечатав на нем такое изображение. В обоих случаях нужны красно-зеленые очки.

Другой вариант — чередовать во времени на экране компьютера левую (зеленую) и правую (красную) половины стереоизображения и смотреть на них через такие очки.

Поляризационные фильтры, поставленные в окнах проектора перед правой и левой половинами стереопары, и соответствующие поляризационные фильтры в очках наблюдателя позволяют рассматривать "висящие в воздухе" произвольно большие цветные стереоизображения, спроектированные на специальный (сохраняющий поляризацию отраженного света) экран.

Одним из современных перспективных средств рассматривания цветных стереоизображений являются жидкокристаллические (ЖК) стереоочки, управляемые компьютером, на мониторе которого появляются попере-

менно правая или левая половины стереопары, синхронно с открыванием правого или левого затвора в ЖК стереоочках.

Любые очки (красно-зеленые, поляризационные или с ЖК затворами) позволяют вести коллективный просмотр стереослайдов или стереокино.

Сравнение таких 3D-технологий, как голографические стереограммы, вариофокальные зеркала, стереопары и альтернирующие пары, проведено в [4].

4. Стереооткрытки, интегральная фотография и голограмма

Проблема наблюдения объемных копий объектов без стереоскопа обсуждается с начала нынешнего столетия. Она включает интегральную фотографию, линзовье раstra, голограмму и другие методы [2].

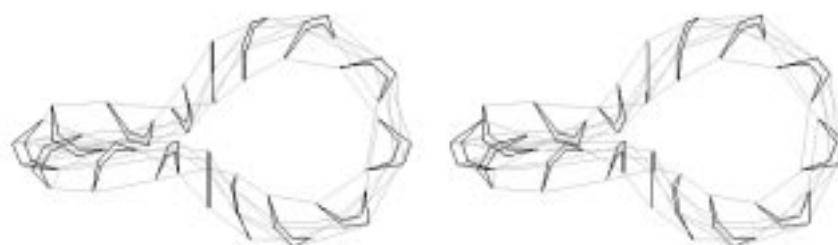


Рис. 8. Горячая плазма в экспериментальной модели термоядерного реактора синтеза

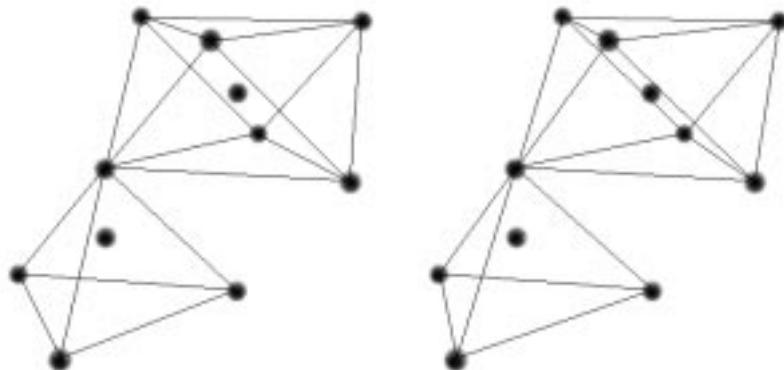


Рис. 9. Элемент структуры глины

Из последних результатов следует упомянуть прикладные работы Ярославского педагогического института (Г.В. Жусь, С.В. Турундаев) и работы Иллинойского технологического института ("фсколограммы" Элен Сандор).

Компьютерные голограммы исследуются в лаборатории MEDIA в Массачусетском технологическом институте (С.А. Бентон), в Московском институте проблем передачи информации (А. Ярославский и др.) и в Алабамском университете (Дж. Колфилд).

5. Фотостереоалгоритм

Как сконструировать стереоизображение? Предположим, что мы рассматриваем параллелепипед вдоль оси Oz , параллелепипед лежит на горизонтальной плоскости

Oxz , повернут вокруг вертикальной оси Oy , и его ближайшая вершина находится в точке $0, 0, 0$.

Предположим, что изображение на сетчатке глаза получается так же, как в фотоаппарате.

Тогда координаты проекций вершины параллелепипеда x, y, z в фокальной плоскости, т.е. на сетчатке правого и левого глаза, будут равны

$$x_l = F \frac{x - d}{1 - z/L},$$

$$x_r = F \frac{x + d}{1 - z/L},$$

$$y_l = y_r = y_1 = F \frac{y}{1 - z/L}, \quad (3)$$

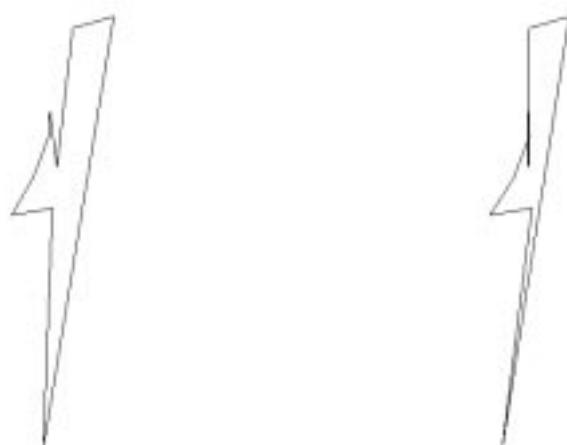


Рис. 10. Линия контакта антиген–антитело

где L — расстояние от точки $0, 0, 0$ до середины линии, соединяющей зрачки глаз, F — фокусное расстояние, d — расстояние между зрачками. Поэтому стереоизображение точки x, y, z есть пара точек на экране с координатами (u_l, v) и (u_r, v)

$$\begin{aligned} u_l &= X_0 + R + mx_l, \\ u_r &= X_0 - R + mx_r, \\ v &= Y_0 - my_1, \end{aligned} \quad (4)$$

где X_0, Y_0 — координаты центра экрана, $2R$ — расстояние между левой и правой половинами стереоизображения, а m — увеличение. Изменяя R , можно выбрать наиболее удобные условия наблюдения изображения.

6. Нахождение пространственных координат

Существует много физических методов определения пространственных координат различных объектов: измерения с помощью радара, сонара и лидара, звуковая, рентгеновская, сейсмическая и др. томография, интерференционная фотография и т.д.

Особый интерес представляет определение пространственных координат по одной фотографии объекта с учетом знаний специалиста о природе объекта, его свойствах и особенностях.

Если объект, изображенный на фотографии, можно аппроксимировать известным трехмерным телом (шар, параллелепипед, пирамида и др.) или комбинацией известных трехмерных тел, то, измеряя размеры проекций этих тел на фотографии, мы можем найти глубину объекта и его частей. Рассмотрим в качестве примера (см. [7]) здание простой формы, которое можно приближенно считать параллелепипедом. Предположим, что наблюдатель находится на земле. Мы должны измерить (например, с помощью "мыши") на экране компьютера расстояния видимой проекции параллелепипеда, аппроксимирующего здание. Для простоты предположим, что расстояние l (от наблюдателя до здания) значительно больше размеров здания; тогда для глубин z_1, z_2 боковых стен здания получим уравнения

$$y_1 = y_0 \frac{l}{l+z_1}, \quad y_2 = y_0 \frac{l}{l+z_2}.$$

Таким образом, для $dy_1 = y_1 - y_0$ и $dy_2 = y_2 - y_0$ имеем

$$\frac{dy_1}{y_0} = \frac{z_1}{l}, \quad (5)$$

$$\frac{dy_2}{y_0} = \frac{z_2}{l}. \quad (6)$$

где y_0, y_1, y_2 — высоты видимых вертикальных ребер параллелепипеда.

Поскольку углы у параллелепипеда прямые, то

$$\frac{z_1}{x_1} = \frac{x_2}{z_2}.$$

Из (5) и (6) имеем

$$z_1 z_2 = x_1 x_2, \quad \frac{z_1}{z_2} = \frac{dy_1}{dy_2},$$

так что мы можем найти глубины z_1, z_2 :

$$z_1 = \sqrt{x_1 x_2 \frac{dy_1}{dy_2}}, \quad z_2 = \sqrt{x_1 x_2 \frac{dy_2}{dy_1}},$$

и расстояние от наблюдателя до здания:

$$l = z_1 \frac{y_0}{dy_1}.$$

7. Примеры

7.1. Вселенная

Каталог красных смещений [5] содержит около 50 тыс. галактик, представленных на рис. 5 как стандартное трехмерное изображение двух параллелепипедов, каждый из которых "разрезан" на 5 горизонтальных слоев. Положительное и отрицательное склонение (от -90 до $+90$ угловых градусов) и долгота в часах (от 0 ч 00 мин до 24 ч 00 мин) отложены по горизонтальным осям параллелепипедов; по его вертикальной оси — скорость галактик (допплеровское смещение) или удаленность (сверху вниз). Слои разделены на кубики, и средняя плотность галактик в каждом кубике показана как степень очернения (от 0 до 16) в серой шкале.

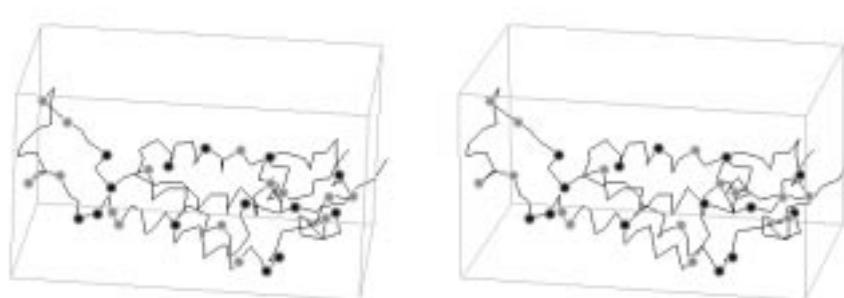


Рис. 11. Белок ВТМ



Рис. 12. Часть спиральной белковой трубы и РНК вируса табачной мозаики

Координаты слоев (в км с^{-1}) и полное число галактик в слое приведены в таблице.

Поскольку интенсивность света от очень далеких галактик, измеренная некоторым прибором на Земле, падает ниже инструментального порога, появляется кажущийся "край Вселенной". Темные искривленные полосы, видимые во всех слоях приблизительно при одних и тех же значениях долготы и склонения, частично обусловлены поглощением света или отсутствием наблюдений в Млечном Пути.

7.1.2. Примерно 1/8 Вселенной (рис. 6)

Представлена в виде стереоизображения около 5000 галактик, изображенных в виде одинаковых точек. Отрицательное склонение (0–90 град) отложено по вертикальной оси параллелепипеда, скорость (красное смещение) или удаленность — по горизонтальной оси параллелепипеда, уходящей вдаль от наблюдателя, долгота в часах (12 ч 33 мин – 16 ч 59 мин) — по второй горизонтальной оси параллелепипеда.

7.2. Винтовая неустойчивость плазмы (рис. 7)

3D-реконструкция одной из первых фотографий винтовой неустойчивости плазменного тороида с током во внешнем магнитном поле. Такие неустойчивости задержали на 30 лет конструирование термоядерного магнитного реактора синтеза.

7.3. Горячая плазма в модели термоядерного реактора синтеза (рис. 8)

Схематическое изображение структуры магнитной поверхности, ограничивающей наиболее горячую область плазмы в установке Т-10, экспериментальной модели термоядерного реактора синтеза. Предполагается, что в термоядерном магнитном реакторе синтеза объемный профиль горячей плазмы будет таким же.

7.4. Глина (рис. 9)

Набухающая глина монтмориллонит состоит из стопок параллельных алюмосиликатных ламелл толщиной 10 Å, с поперечными размерами порядка 1 мкм, разделенных равными водными промежутками.

Ламелла состоит из двух слоев Si-O тетраэдров (Si — в центре тетраэдра, O — в его вершинах), между которыми находится один или два (в разных минералах) слоя Al-O-октаэдров (Al — в центре октаэдра, O — в вершинах); на рис. 9 схематически показана нижняя часть ламеллы. Вниз от слоя тетраэдров к слоям воды направлены водородные связи.

Примерное равенство периода гексагональной структуры в плоскости алюмосиликатной ламеллы и периода льда I является главной причиной способности глины к набуханию. Другим необходимым условием набухания является наличие в природном минерале примесей Mg^{++} (замещающего Al^{+++}) или Al^{++} (замещающего Si^{+++}), создающих в ламелле алюмосиликата отрицательный заряд, что вызывает появление в водном промежутке между ламеллами 1-, 2- и 3-валентных катионов Na^+ , Ca^{++} , Fe^{++} .

Толщина водного промежутка определяется балансом сил Ван-дер-Ваальса, электростатических сил и осмотического давления. Она зависит от концентрации соли в воде и меняется от 0 до 100 Å. Чередующиеся слои алюмосиликата и воды образуют ламеллярные структуры толщиной до долей микрона.

7.5. Контакт антигена—антитело (рис. 10)

Как связываются антиген и антитело? Механизм их взаимодействия давно обсуждается в научной литературе. В 1986 г. впервые опубликованы данные о строении (на молекулярном уровне) комплекса антигена-антитело — белка лизоцима Lys, служившего антигеном, и одного из иммуноглобулинов крови белка, называемого Fab, служившего антителом. Анализ множества аминокислот в области контакта этих двух белковых молекул показывает, что сама область контакта представляет собой почти плоскую неправильную замкнутую кривую ("кольцо") диаметром 30 Å и "толщиной" 5 Å. Точками изображены середины отрезков, соединяющих атомы углеродной цепи молекулы антигена Lys и атомы углеродной цепи молекулы антитела Fab, отстоящие друг от друга не более чем на 6 Å. Таким образом, здесь область контакта двух макромолекул — кривая в пространстве. Контакт не похож ни на

Таблица

км с^{-1}	0	10	30	50	70	100	150	200	300	400	500	900
Слой	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Число галактик	20951	1258	4573	5246	5044	5491	5786	3144	2859	1084	737	1510

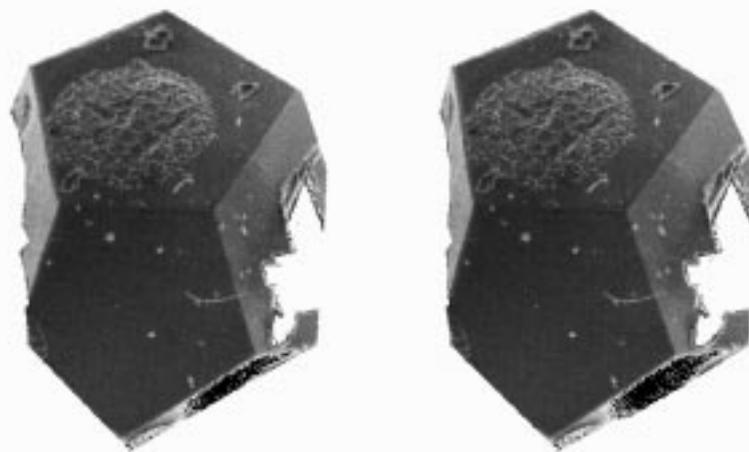


Рис. 13. Трехмерная реконструкция образца квазикристалла

контакт типа "рука — перчатка" (две прилегающие друг к другу в конечной области поверхности), ни на контакт типа "неровный камень — плоскость" (три точки соприкосновения).

7.6. Вирус табачной мозаики

Вирус табачной мозаики (ВТМ) — исторически первый обнаруженный вирус и один из первых вирусов, структура которого на молекулярном уровне установлена полностью. Вирус состоит из навитой по спирали белковой трубы (с внешним диаметром 180 Å, внутренним диаметром 40 Å и длиной 3000 Å) и РНК, расположенной в виде винтовой линии на внутренней поверхности трубы. Белковая трубка состоит из 2130 идентичных белковых молекул (рис. 11), уложенных в правую спираль (49 молекул белка на 3 витка спирали) с шагом 23 Å (рис. 12).

В физических экспериментах, при различных рН и ионной силе, вместо трубы ВТМ образуются другие агрегаты: длинные спиральные агрегаты; агрегаты с 42, а не с 49 субъединицами на 3 витка; белковый диск из 34 субъединиц или два с небольшим витка спирали из 38 субъединиц; диски и их агрегаты; смеси небольших олигомеров.

ВТМ, как и любой другой вирус, — это чисто физический объект (по крайней мере, вне клетки растения, в которой он размножается). С физической точки зрения ВТМ представляет собой гигантскую молекулу с вполне определенным расположением атомов в пространстве. Вопросы исследования структуры ВТМ, его движения, прохождения через различные микроскопические барьеры, связывания с поверхностями, деградации и т.д. относятся к традиционной области физики. Сюда же относятся проблемы наблюдения, диагностики концентрации и типа вируса, фильтрации вирусов и т.д.

7.7. Трехмерная реконструкция образца квазикристалла (рис. 13)

Исходным материалом для реконструкции послужила фотография: An Pang Tsai, Akihisa Inoue, Tsuyoshi Masumoto (Tohoku University), из статьи: Стивенз П В, Гоулдман А И Структура квазикристаллов *В мире*

науки, июнь 1991 г., с. 15 (Stephens P W, Goldman A I *The structure of quasicrystals Sci. Am.* **264** (4) (1991)).

7.8. Портрет сэра Исаака Ньютона (рис. 14)

Реконструкция по портрету Годфри Кнеллера (*Sci. Am.* **122** (March 1981)) и фотографии барельефа Дж. Веджвуда (из книги: Вавилов С И *Исаак Ньютон* (М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945)).

8. Восстановление трехмерной сцены по стереоизображению

До сих пор мы обсуждали построение стереоизображений. Есть, однако, задача, в некотором смысле обратная задаче построения, — анализ оцифрованной стереопары и, как результат, реконструкция изображенной на ней трехмерной сцены.

В научных исследованиях простейшая (после обычного фотографирования) форма фиксации информации об объекте — сделать две фотографии одновременно в различных ракурсах, в частности сделать стереофотографию объекта.

Этот метод давно применяется в различных областях научных исследований, например в

- материаловедении;
- биологии;
- медицинской науке;
- гидромеханике, в частности в исследованиях взрыва;
- криминалистической науке и приложениях;
- архитектуре;
- математике;
- антропологии;
- науке о космосе;
- географии;
- образовании.

Реконструкция 3D-сцены путем анализа стереоизображения необходима также для решения ряда прикладных задач: дистанционного определения рельефа поверхности Земли (или другой планеты), рельефа морского дна, для автономной навигации передвигающегося робота и т.п.



Рис. 14. Стереопортрет "Сэр Исаак Ньютона" (серая полутооновая версия)

Основная идея всех методов решения этой задачи — найти соответствующие, или гомологичные, точки на левой и правой половинах стереопары и по расстоянию между этими точками определить локальную глубину данной точки.

Для решения этой задачи за последние десятилетия были предложены различные алгоритмы: иерархические алгоритмы Марра—Поджио—Гримсона, алгоритм взаимного усиления точек одинаковой диспаратности Праздны, ряд нейросетевых алгоритмов, алгоритмы восстановления формы по тени и по изменениям текстуры, фрактальные алгоритмы.

Однако задача эта очень сложна и, по-видимому, в настоящее время далека от решения — понимание сцены, изображенной на стереопаре, предполагает наличие в памяти компьютера весьма обширных разносторонних знаний о мире, и возможность формального анализа стереопары без этого знания представляется в общем случае маловероятной.

Это, конечно, не исключает возможность создания системы эффективного анализа стереопар для ограниченной предметной области, например анализа рельефа, зданий, сооружений, принадлежащих к определенным (известным заранее) категориям.

В ряде случаев для восстановления трехмерной структуры объекта или сцены нужно найти не слишком большое число гомологичных точек. В этом случае возможен компромисс — работа делится между человеком и компьютером. Человек находит (работая, например, с "мышью") ряд важных пар точек — гомологов на фотостереопаре, выведенной на монитор компьютера, сводя тем самым задачу к нескольким более простым, а затем остальная часть работы выполняется компьютером. Другой путь — разделить вручную сцену на части, а затем реконструировать пространственное положение точек в этих частях автоматически с помощью одного из упомянутых алгоритмов (аналогичные методы при-

менялись для решения "задачи о коммивояжере"; см. [12]). Примером может служить восстановление структуры углеродного скелета лизоцима по его опубликованной стереопаре [3].

С помощью сканера в компьютер можно ввести стереоизображения, публикуемые в периодической научной печати [13] и монографиях (например, стереоизображение волокнистого фильтра, стереоизображения трех форм ДНК, стереоизображения различных объектов микромира) и затем создавать 3D-копии этих объектов.

9. Заключение

Объемная компьютерная копия объекта — это "база данных", которая не только содержит полные пространственные координаты и яркости (или цвета) всех точек объекта, но и дает также возможность взглянуть на сложный объект "с птичьего полета", выявляя некоторые черты объекта как целого.

Как говорит старая китайская пословица, "одна картина стоит десяти тысяч слов" [14].

После создания компьютерной копии объекта ее можно вращать, перемещать ближе к наблюдателю или дальше от него, изменять масштаб, цвет, выполнять различную "фильтрацию" и производить другие преобразования.

Весьма многообещающим представляется визуализация как объемной копии невидимых объектов: полей температур, интенсивности радиоактивного или нейтронного излучения (естественного и техногенного) и т. п.

В заключение мне хотелось бы выразить признательность ученым, без помощи которых написание этой статьи было бы невозможным. Файлы координат атомов комплекса Lys—Fab любезно предоставлены Ю. П. Лысовым (Институт молекулярной биологии РАН, Москва), фотография винтовой неустойчивости плазменного тороида и результаты трехмерных измерений

температуры в плазменном тороиде — К. А. Разумовой (Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва), каталог красных смещений с комментариями — В. С. Аведисовой (Институт астрофизики, Москва), информация о работах в Illinois Institute of Technology — А. А. Филиковым (Институт проблем математики, Москва). Всем им я приношу искреннюю благодарность.

Список литературы

1. Валис Н А *Стереоскопия* (М.: Физматгиз, 1962)
2. Окоси Т Получение объемных изображений *ТИИЭР* **68** (5) 5 (1980)
3. Веденов А А *Математика стереоизображений* (М., 1991)
4. Hodges L F, McAllister D F *SPIE* **761** 146 (1987)
5. Huchra J P, Geller M J, Clemens C M, Tokarz S P, Michel A *The CfA Redshift Catalogue*. Version (Feb. 1992)
6. В мире науки (1) 90 (1987); оригинал: *Sci. Am.* **255** (5) (Nov. 1986)
7. *Encyclopaedia of Modern Architecture* (Ed. G Hatje) (London: Thames and Hudson, 1975)
8. Unterseher F et al. *Holography Handbook* (1982)
9. Кравков С Стереоскопия. В кн. *Техническая энциклопедия* (М., 1933)
10. Брокгауз Ф А, Эфрон И А *Энциклопедия* (СПб., 1901)
11. Агафонов С Дальномеры. В кн. *Техническая энциклопедия* (М., 1933)
12. *The traveling Salesman Problem* (Eds. E L Lawler et al.) (New York: John Wiley & Sons, 1984)
13. *Nature. Structural Biology* **1** (3) (1994); *Structure* **1** (4) (1993)
14. Malkiel B G *A Random Walk down Wall-Street* (New York: Norton, 1973)

VOLUME COMPUTER COPIES OF OBJECTS

A.A. Vedenov

Russian Research Center Kurchatov Institute, Moscow
46, Kurchatov Square, 123182, Moscow, Russia

Now a scientists can create on the basis of personal computers space (3D) copies of objects — special data bases which contain not only total space coordinates and colours of all points of the object, but allow to see on it from "a bird's eye view" that extracts typical peculiarities of the object as a whole and allows to give denominations for them. Examples of 3D copies of objects are represented, principles of their creation and observation are discussed.

Bibliography – 14 references

Received 19 May 1994