

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР.
БИОУПРАВЛЕНИЕ**

УДК 681.3.06

А. М. Ковалев*(Новосибирск)***О ЦЕНТРАЛЬНЫХ ПРОЕКЦИЯХ ТРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА***

Рассматриваются центральные проекции пространства на плоскость в рамках систем классической линейной перспективы и нелинейной перспективы по Б. В. Раушенбаху. Отмечается, что плоские изображения воспроизводят окружающий мир искаженно. Показано, что с точки зрения геометрии, физиологической оптики и психологии зрительного восприятия наиболее полно требованиям виртуализации трехмерного пространства отвечает сферическая перспектива, которая формирует изображения на сфере без геометрических, интерпозиционных и яркостных или цветовых искажений. Предложена модель пространства изображений для подвижного глаза с учетом аккомодации.

Введение. С. Р. Эллис в своем эссе о природе и началах виртуальной окружающей среды [1] дает определение виртуализации как некоторого «процесса, посредством которого зрительное восприятие человека, интерпретируя впечатление от увиденного изображения, распространяет его на объекты в окружающей среде, отличные от существующих физически». При этом различаются три фазы виртуализации: виртуальное пространство, виртуальное изображение и виртуальная среда. Первая фаза определяется конструкцией пространства, проективным преобразованием, интерпозицией объектов и их раскраской с учетом градиента текстуры. Вторая фаза обеспечивается бинокулярным восприятием изображения, при котором активизируются такие свойства зрения, как аккомодация, конвергенция и стереоскопическая диспаратность, что позволяет ощущать предметы в глубину и оценивать третье измерение пространства. И наконец, на третьей фазе — в виртуальной окружающей среде — добавляются параллакс движения и глубинно-фокусные вариации взгляда, что отвечает оптокинетическим и вестибулярно-окулярным физиологическим рефлексам. При достаточно больших угловых размерах изображения, согласованных с полем зрения глаз человека (до 180° по горизонтали и 125° по вертикали), описанный процесс виртуализации может обеспечить иллюзию присутствия наблюдателя в синтетическом трехмерном мире, или наиболее естественное «погружение в виртуальную реальность». Виртуальная реальность — это область информатики и компьютерной графики реального времени, которая зародилась в тренажеростроении [1, 2] и бурно развивается теперь как новая среда для компьютерной коммуникации и телеуправления [1, 3].

Настоящая работа посвящена первой фазе виртуализации, а конкретно, определению проективного преобразования, пригодного для выявления прост-

* Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 95-01-00028а).

Компьютерная графика активно использует линейность пространства изображений как для решения проблемы интерпозиции объектов, или удаления невидимых поверхностей, так и для получения плоского изображения с помощью аксонометрии. При этом алгоритмы синтеза изображений достигают такого совершенства, что работают в реальном времени на персональном компьютере [6].

Линейная перспектива, несмотря на классическую древность и блестящие успехи применения не только в компьютерной графике, но главным образом в сфере коммуникации, образования, культуры, сохранила недостатки, не позволяющие применять ее для выявления пространства при больших полях наблюдения и малых расстояниях до объектов.

Первыми критиками линейной перспективы стали художники, которые отображали окружающий мир по-своему, каким воспринимали его визуально. На базе анализа геометрических построений в живописи разных эпох от Древнего Египта до импрессионистов академик Б. В. Раушенбах разработал основы теории системы перцептивной перспективы [7], которая включает линейную перспективу как частный случай.

Нелинейная перспектива по Б. В. Раушенбаху. Система перцептивной перспективы получается путем перенесения на плоскость геометрических свойств перцептивного пространства, которое, согласно [7], возникает в сознании человека путем «растяжения» или «сжатия» линейного пространства изображений. Свойства перцептивного пространства, следуя психологии зрительного восприятия, определяются действием механизмов константности величины и формы [7, с. 247].

Механизм константности величины связан с компенсацией уменьшения изображения объектов по мере их удаления от наблюдателя. В зоне непосредственного окружения человека (в радиусе единиц метров) эта компенсация почти полная и линейная перспектива фактически заменяется аксонометрией. Поскольку единственной переменной, от которой зависят численные величины «растяжения» и «сжатия», является расстояние вдоль зрительной оси, то считается, что деформациям будет подвержено все воспринятое пространство.

Механизм константности формы связан с компенсацией изменения формы объекта. Это более сложный механизм психологии зрительного восприятия; так, если человек знает по своему опыту, что форма предметов — это, например, круг или квадрат, то он воспримет овал в перспективе более круглым, а ромб — близким к квадрату, т. е. в восприятии стабилизируется именно форма предмета.

Механизм константности формы, не деформируя остальное пространство, связан с конкретным предметом, и поэтому локальная деформация пространства может меняться при замене одного предмета другим, а это создает известные трудности однозначного воспроизведения перцептивного пространства. Система перцептивной перспективы в узком смысле слова учитывает лишь механизм константности величины. «Жесткая» перцептивная перспектива определяется следующим проективным преобразованием:

$$x'' = -xF(z)/z, \quad y'' = -y \int_z^{\infty} \frac{F(z)dz}{z^2}, \quad z'' = -\int_z^{\infty} \frac{F(z)dz}{z^2}, \quad (2)$$

где $F(z) = 1 + \operatorname{arctg}(z - z_0)$ — непрерывная и монотонная функция расстояния от наблюдателя, предложенная Б. В. Раушенбахом. Функция удовлетворяет следующим условиям: $F(z_0) = 1$, где z_0 — расстояние до плоскости проекции; $F(\infty) = 1 + \pi/2$; $dF/dz(z_0) = 1$. Количественное соответствие выбранной зависимости $F(z) = 1 + \operatorname{arctg}(z - z_0)$ опыту зрительного восприятия человека подтверждено экспериментальным путем [7, с. 255].

На рис. 2 в одинаковых масштабах показаны сечения плоскостями $y' = y'' = 0$ двух пространств изображений: линейного (а) и деформированного функцией $F(z)$ при $z_0 = 1$ (б). Рассмотрим, как преобразуются гомоцентрический и параллельный пучки из линейного пространства в нелинейное. Гомоцентрический пучок, соответствующий параллельным линиям

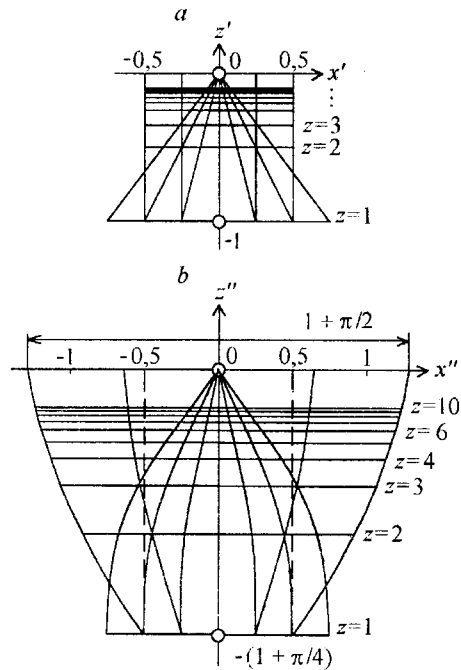


Рис. 2

пространства объектов и отражающий само понятие «перспективы», превращается в гомоцентрический криволинейный пучок, причем на малых расстояниях до объектов ($z \rightarrow 1$, $z'' \rightarrow -1 - \pi/4$) отчетливо проявляется механизм константности величины, поскольку линии гомоцентрического пучка практически параллельны. На больших расстояниях ($z \rightarrow \infty$, $z'' \rightarrow 0$) гомоцентрические пучки в линейной и нелинейной перспективах практически совпадают.

Параллельный пучок линейного пространства изображений отражает линии визирования или линии взгляда, вдоль которых осуществляются интерпозиция объектов и удаление элементов поверхностей, скрытых более близкими объектами. К сожалению, этот пучок также деформируется и, расширяясь по мере удаления от наблюдателя, увеличивается по оси Ox'' на «бесконечности» в $1 + \pi/2 \approx 2,57$ раза. Чтобы сохранить «константность» величин, проекцию на плоскость и удаление невидимых поверхностей необходимо производить вдоль линий, параллельных оси z'' , но в таком случае нарушается интерпозиция объектов, даже при $z \rightarrow \infty$. Таким образом, предложенная нелинейная перспектива не дает интерпозиционных искажений в тех случаях, когда нет необходимости удалять невидимые поверхности, например при отображении подстилающей земной поверхности (рис. 3: a — линейная перспектива, b — нелинейная). Во всех остальных случаях при нелинейной проекции на плоскость неизбежно возникают искажения. Преобразование (2) неизотропно. Наибольшие искажения возникают при отображении вертикальных отрезков прямых, расположенных вблизи от наблюдателя, т. е. там, где проявляется механизм константности величины. В [7, с. 250—254] показано, что без искажений передать перцептивное пространство на плоскости принципиально невозможно. Например, невозможно изобразить на плоскости полный бесконечный цилиндр, расположенный вдоль зрительной оси, поскольку проекция образующей цилиндра оказывается больше проекции ближнего радиуса обреза цилиндра; невозможно без искажений отобразить интерьер комнаты, хотя каждую стену, потолок и пол по отдельности изобразить можно.

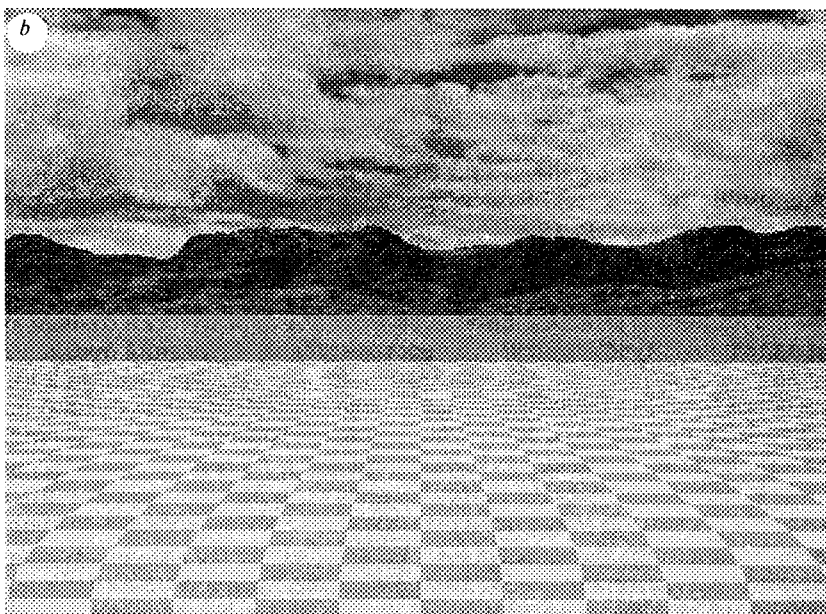
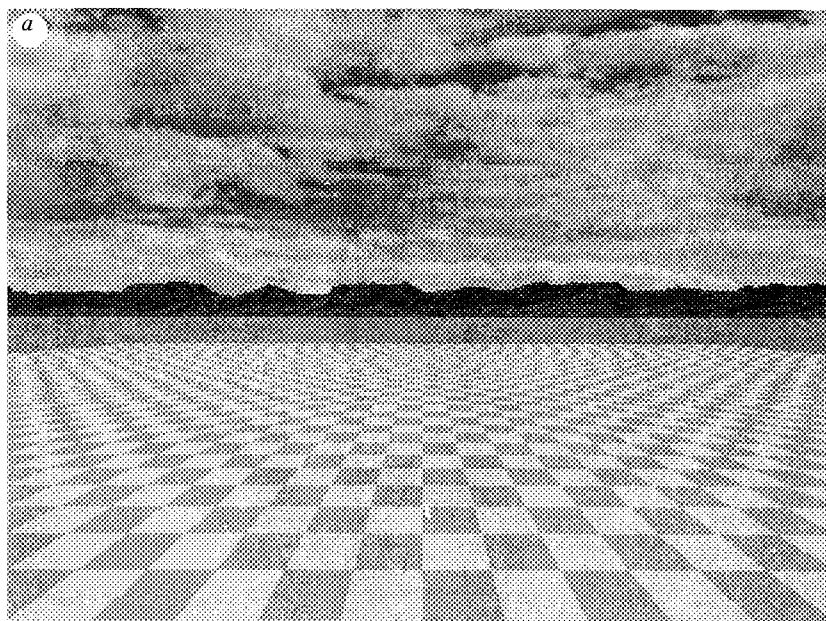


Рис. 3

Недостатки известных систем. Рассматривая системы проекций с точки зрения пригодности для отображения виртуального пространства на малых расстояниях до объектов при больших полях зрения с учетом движений глаз, о чем сообщалось во введении, можно прийти к следующим выводам:

1. Линейная перспектива изображает объекты на малых расстояниях искаженно вследствие того, что не учитывает механизма константности величины. В результате на плоских изображениях близкие предметы оказываются излишне увеличенными.

2. Нелинейная перспектива по Б. В. Раушенбаху включает механизм константности величины на малых расстояниях и линейную перспективу — на больших. В результате возникает аксонометричность близких предметов, увеличиваются в размерах удаленные предметы и, кроме того, проявляется удивительный эффект *обратной перспективы* при монокулярном наблюдении предметов в ракурсе [7, с. 263—270]. Существенным ограничением предложенной системы является нарушение интерпозиции объектов, что не дает возможности отобразить на плоскости трехмерное пространство однозначно и неискаженно.

3. В основе рассмотренных систем лежит метод центрального проецирования из некоторой неподвижной точки на неподвижную плоскость, перпендикулярную зрительной оси. Следовательно, подразумевается неподвижность глаза человека. Но это противоречит не только физиологии глаза [8], но и психологии зрительного восприятия, поскольку глазные движения включаются в перцептивный процесс [9, 10].

4. Плоское изображение неспособно в принципе обеспечить широкое поле зрения глаз с учетом их движения. Как известно, угловые размеры пространства, наблюдаемого условно неподвижным глазом, равны: книзу 70° , кверху 55° , к носу 60° и к виску 90° . Движение глаз позволяет увеличить просматриваемое пространство. Наибольшее отклонение зрительной оси в сторону достигает $40\text{—}50^\circ$, по вертикали — 23° [4, 8]. Таким образом, просматриваемое пространство по горизонтали может быть больше 180° .

Поверхности изображений. На наш взгляд, основной причиной, определяющей все геометрические погрешности известных систем перспектив, является *использование плоских поверхностей*, на которые проецируется трехмерное пространство объектов.

Плоскость — это абстрактная виртуальная среда для коммуникации [1], которая отличается уникальным свойством иметь разнообразное физическое воплощение: лист бумаги или полотно картины, фотоснимок или киноплёнка, экран телевизора или монитора компьютера. Человечество просто обязано своим развитием этому утилитарному свойству плоскости. Возможно, поэтому изображение трехмерного пространства с помощью линейной перспективы считается до сих пор единственно верным, а нелинейная перспектива на плоскости вследствие ее неоднозначности дает лишь живописцам простор для творчества.

Выше мы показали недостатки плоских изображений. Возникает естественное предположение, что на смену *плоскости* для новой *компьютерной среды* коммуникации должна прийти *криволинейная поверхность*. Какая? Для имитации отдельных точек объектного пространства вид поверхности не имеет решающего значения. Для имитации трехмерных объектов и их адекватного восприятия решающими становятся формообразующие, а вернее, «формосохраняющие» возможности поверхности. Естественным требованием к поверхности является сохранение формы при перемещении и/или вращении проекций объектов или отображающей поверхности, т. е. соблюдение геометрических принципов транзитивности движения и вращения, подобных «постулатам движения» в евклидовой плоскости [11, с. 144—146]:

а) *поверхность может быть перемещена в самой себе таким образом, чтобы любая ее точка А пришла в совмещение с любой другой ее точкой А' (принцип транзитивности);*

б) *поверхность может быть повернута в самой себе вокруг любой ее точки А таким образом, чтобы луч АВ, выходящий из центра вращения, совместился с любым другим лучом АВ', также выходящим из центра вращения (принцип вращения).*

Набор поверхностей, на которых возможны движения фигур без деформации с тремя степенями свободы, в евклидовом пространстве ограничен — это только плоскости и сферы; им соответствуют два типа двумерной геометрии — плоская и сферическая, как говорят, *евклидова* и *риманова*.

Покажем, что центральная проекция трехмерного пространства на сферу удовлетворяет требованиям первой фазы процесса виртуализации реального

мира, а именно: а) обеспечивает большие угловые размеры поля наблюдения, перекрывающие поле зрения человека; б) учитывает глазные движения; в) обеспечивает геометрические свойства, вызывающие механизм константности величины.

Сферическая перспектива. Пусть пространство объектов задано в декартовой прямоугольной системе координат, начало которой совпадает с центром проекции (рис. 4, а). Тогда через радиус-вектор любой точки $P \equiv [x, y, z]$ этого пространства проходит луч, принадлежащий гомоцентрическому пучку проекции, а сама точка лежит на поверхности сферы и имеет сферические координаты r, θ, φ (полярный радиус, широта и долгота). Совокупность всех сфер пространства объектов является сферическим пространством изображений. Известная связь между декартовыми прямоугольными и сферическими координатами — в данном случае *сферическое проективное преобразование*:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \cos\theta = z/r, \quad \operatorname{tg}\varphi = y/x. \quad (3)$$

Первая формула выражает расстояние до точки и может быть использована для удаления невидимых поверхностей объектов вдоль луча, заданного радиусом-вектором $P \equiv [x, y, z]$, а две последние определяют угловые координаты точки (широту θ и долготу φ) на *сферическом изображении*.

Нетрудно видеть, что: 1) пространство объектов и пространство изображений совпадают; 2) преобразование (3), которое является лишь заменой системы координат, не деформирует пространство объектов-изображений; 3) проекция на сферу производится вдоль лучей, ортогональных поверхности изображений. Таким образом, центральная проекция трехмерного пространства на

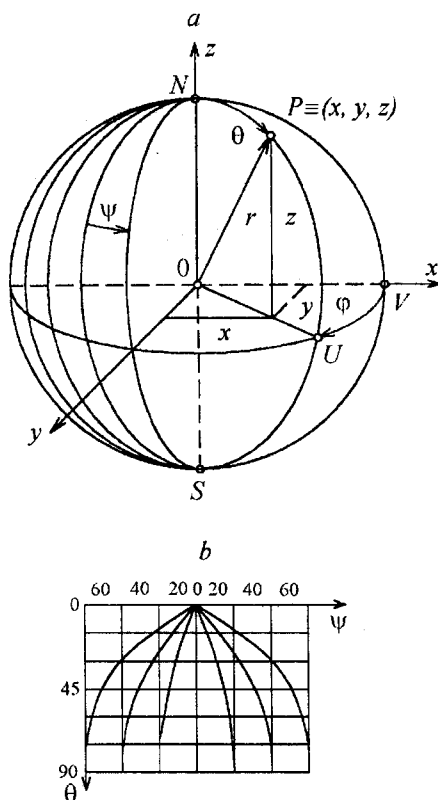


Рис. 4

сферу не вносит в изображение ни геометрических, ни интерпозиционных, ни яркостных (цветовых) искажений, и в этом смысле сферическая перспектива формирует *идеальное изображение* трехмерного пространства.

Широкое поле наблюдения. Очевидно, что пространство изображений может быть заполнено до телесного угла, равного 4π . Поэтому сферическое изображение способно перекрыть поле зрения человека.

Учет движений глаза. Если центр проекции совместить с центром вращения глазного яблока, а исходящий гомоцентрический пучок рассматривать как пучок зрительных осей, то становится очевидным, что сферическая перспектива инвариантна основному движению глаза — вращению — при осуществлении установочных, следящих, вергентных и, возможно, сенсорных функций системы зрения [9].

Механизм константности величины. Пучок параллельных в объектном пространстве линий отображается на сферу в виде полуокружностей больших кругов, плоскости которых пересекаются по прямой, параллельной этому пучку и совпадающей с их общим диаметром. Следовательно, имеются две точки «схода» полуокружностей, одна из которых соответствует $+\infty$ вдоль параллельного пучка, а другая — $-\infty$. На рис. 4, *a* показано, как могут отобразиться на сфере некоторые линии, параллельные оси Oz , образуя точки схода N и S при $\theta_N = 0$ и $\theta_S = \pi$, т. е. у полюсов сферы. В этом случае пучок параллельных линий пространства объектов оказался сопряженным с совокупностью меридиан. Угловое расстояние ψ (или длину дуги) между отдельными меридианами при изменении широты θ от полюса ($\theta = 0^\circ$) до экватора ($\theta = 90^\circ$) можно определить из сферического треугольника, образованного двумя сторонами, лежащими на этих меридианах, и искомой стороной на соответствующей параллели. Наибольшее расстояние ψ_{\max} на экваторе равно разнице между меридианами по долготе. Например, для треугольника UNV $\psi_{\max} = \varphi$. Наименьшее расстояние $\psi_{\min} = 0$ в точке схода. На рис. 4, *b* приведен график изменения угловых величин $\psi(\theta)$ для меридиан, отстоящих по долготе на 20° . В районе экватора, т. е. на малых расстояниях параллельных линий от наблюдателя, прослеживается *константность угловых величин (дуг)*. Поскольку при $\theta = 90^\circ$ меридианы образуют с экватором прямые углы, наблюдается полная параллельность линий. По мере удаления от наблюдателя сферическая перспектива приближается к линейной.

Линейная перспектива в пространстве изображений сохраняет тангенсы углов, под которыми видна точка в пространстве объектов (см. рис. 1), а не сами углы, как в сферической перспективе. При малых углах наблюдения и больших расстояниях до объектов, когда $\theta \approx \text{tg}\theta$, сферическая и линейная перспективы геометрически и по масштабу практически совпадают, а при больших углах наблюдения и малых расстояниях до объектов сферическая перспектива уменьшает размеры предметов по сравнению с линейной в масштабе от $\theta/\text{tg}\theta$ до z/r в зависимости от способов сравнения размеров плоского и сферического изображений.

Обратная перспектива объектов в ракурсе. Упомянутый эффект возникает в тех случаях, когда параллельные линии, на которые смотрит наблюдатель, направлены не «от» него, а несколько «наискось» [7, с. 263]. Ракурс проекций параллельных линий на сфере (см. рис. 4, *a*) возникнет, если зрительную ось повернуть не к полюсу, а несколько «наискось» к экватору. При этом поле зрения человека захватит точку схода линий на полюсе, экватор, где наблюдается максимальное угловое расстояние между меридианами, а также область за экватором, ближнюю к другому полюсу, где это расстояние начнет уменьшаться, вызывая «эффект обратной перспективы». На самом деле, никакой обратной перспективы нет. Это обычная прямая перспектива, поскольку на экваторе расстояние r в сферической системе до параллельных линий в объектном пространстве минимально, а по обе стороны от экватора расстояние до линий возрастает, вызывая уменьшение расстояний между линиями на сферической проекции.

Сферическая перспектива, удовлетворяющая требованиям процесса виртуализации реального мира, построена с использованием простейшей мо-

дели подвижного глаза в виде вращающейся зрительной оси. Рассмотрим, во-первых, насколько это оправдано с точки зрения физиологической оптики и психологии зрительного восприятия и, во-вторых, каким образом может повлиять на модель учет других движений глаза, например связанных с изменением формы хрусталика, т. е. аккомодации, или способности к фокусировке равноудаленных предметов.

Глаз и его вращения. На рис. 5 представлен меридиональный разрез глаза, построенный на основе схематического глаза по А. Гульстранду [12]. Показана зависимость остроты зрения от углового положения чувствительных к свету элементов. Разрешающий угол, равный $\approx 1'$ в области фовеа, практически линейно увеличивается с приращением примерно $5'$ на каждые 10° отклонения от нее. Очевидно, что острота зрения — величина, обратная разрешающему углу, — резко падает при отклонении лучей от зрительной оси и информация от сетчатки поступает в головной мозг как бы от остро направленной «антенны». В области фовеа, или *рабочего поля зрения* радиусом $\approx 10^\circ$ и менее, происходит симультанная обработка данных [13]. Данные от периферического зрения (малое разрешение) несут вспомогательную, но не менее важную информацию о событиях, которые могут привлечь внимание в будущем, вызывая афферентируемые скачки, или *саккадические движения* (саккады). Скачки обеспечивают перемещение фовеального зрения путем вращения глаза. Это очень важный вид движения, изучение которого показывает [9]:

1) при больших углах поворота до 60° скачки, как правило, сопровождаются поворотом головы; при углах поворота не более $15-20^\circ$ типичны повороты глаз, состоящие из двух и более скачков с промежуточными фиксациями между ними, которые не осознаются субъектом; минимальная амплитуда произвольных скачков $1-30'$;

2) продолжительность и скорость скачков определяются необходимым углом поворота глаз и не зависят ни от его направления, ни от положения глаз перед скачком; скорость скачка не поддается произвольному управлению;

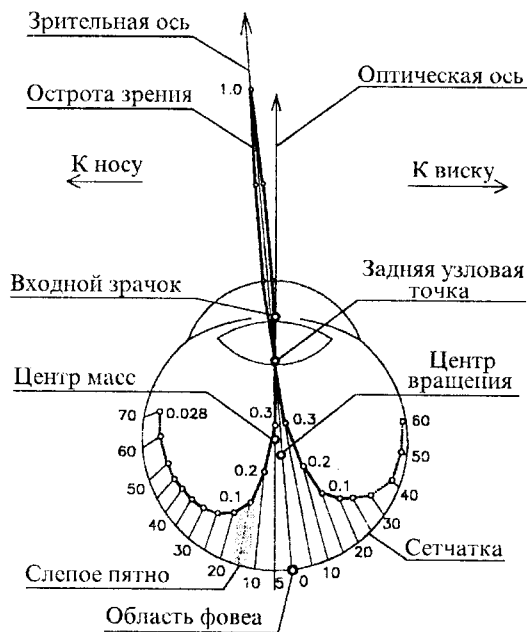


Рис. 5

3) в течение латентного периода, т. е. от момента появления афферентного сигнала до начала скачка, производится «измерение» углового расстояния и «программирование» движения до будущей точки фиксации;

4) точность зрительно афферентируемых скачков имеет порядок 4,5—6' при амплитуде порядка 10°; при больших амплитудах основной скачок сопровождается маленьким поправочным скачком, но и тогда амплитуда первого скачка отклоняется от заданного не более чем на 18—30'.

Результаты исследований показывают, что восприятие пространства объектов мозгом человека происходит параллельно-последовательным способом, причем в моменты фиксации взгляда параллельно обрабатываются практически плоские изображения в рабочем поле зрения небольшого размера $\leq 20^\circ$. Восприятие пространства при больших полях зрения происходит последовательно. При этом неизбежно возникают скачкообразные перемещения рабочего поля зрения путем вращения глаза. Важно и то, что возможные угловые невязки из-за несовпадения центров проекции (входной зрачок и задняя узловая точка) и центра вращения мозг успешно компенсирует путем «предварительного вычисления» параметров движения в латентном периоде до наступления скачка, обеспечивая точность зрительно афферентируемых скачков не ниже разрешающей способности сетчатки.

Таким образом, система зрения человека в полной мере приспособлена к восприятию сферической перспективы трехмерного пространства.

Пространство изображений подвижного глаза. Будем считать, что, во-первых, принятая ранее модель подвижного глаза в виде вращающейся зрительной оси справедлива и, во-вторых, вдоль зрительной оси справедлива формула Ньютона несмотря на то, что оптическая и зрительная оси глаза не совпадают. Угол между ними $\approx 5^\circ$. С учетом своеобразного измерения расстояний в геометрической оптике (рис. 6) пространство изображений подвижного глаза можно определить из (3) следующим образом:

$$r' = b' - f' - ff' / (r - f - b), \quad \theta' = \theta, \quad \varphi' = \varphi, \quad (4)$$

где b, b' — расстояния от центра вращения до главных плоскостей оптической системы H, H' ; F, F' — передний и задний фокусы; f, f' — фокусные расстояния; r, θ, φ — сферические координаты точки в объектном пространстве; r', θ', φ' — сферические координаты точки в пространстве изображений глаза.

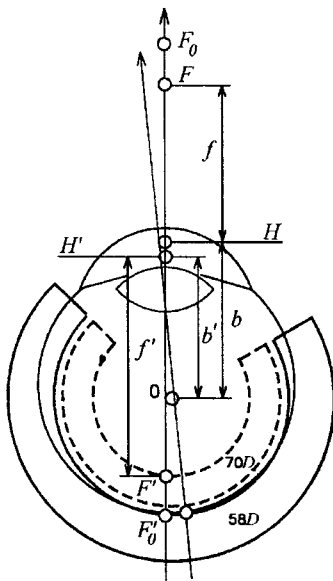


Рис. 6

Пространство имеет вид сферической коры конечных размеров. Точки на внутренней сфере меньшего радиуса сопряжены с бесконечно удаленными точками пространства объектов. Внешняя сфера большого диаметра сопряжена с ближними точками. Размеры пространства изображений зависят от степени аккомодации глаза. На рис. 6 показаны сечения двух пространств изображений: сплошными линиями — для покоя аккомодации (58 диоптрий) и штриховыми — для максимума аккомодации (70 диоптрий). Толщина коры изменяется от 2,6 мм при наибольшей аккомодации до 3,8 мм при покое аккомодации. Внутренний радиус меняется соответственно от 6,6 до 10 мм для схематического глаза по А. Гульстранду.

Если положить фокусные расстояния равными $f = f' = 1$ и фокусы совместить с центром проекции (центром вращения), как принято в компьютерной графике, то получим нормализованную модель сферического пространства изображений подвижного глаза, в которой из (4) имеем:

$$\begin{aligned} r'' &= -1/r, & \theta'' &= \theta, & \varphi'' &= \varphi, & \text{или} & & (5) \\ x'' &= -x/r^2, & y'' &= -y/r^2, & z'' &= -z/r^2, \end{aligned}$$

где x'' , y'' , z'' — система декартовых прямоугольных координат пространства изображений, совпадающая с системой координат объектного пространства.

Преобразование (5) сопрягает прямые и плоскости из пространства объектов с окружностями и сферами в пространстве изображений. На рис. 7 для сравнения показаны два изображения объекта AP : $A'P'$ — в линейном пространстве и $A''P''$ — в сферическом, полученном с помощью преобразования (5). В нормализованной модели полярное расстояние $|r''|$ пропорционально аккомодации в диоптриях, что полезно при учете глубинно-фокусных вариаций взгляда на третьей фазе процесса виртуализации. В остальном, поскольку пространство сохраняет угловые соотношения объектного пространства, выводы относительно свойств сферической перспективы совпадают со сделанными ранее. Поэтому рассматриваемое пространство имеет, скорее, теоретический, чем практический интерес.

Закключение. Системы классической линейной и нелинейной (по Б. В. Раушенбаху) перспектив формируют изображения на *плоских* поверхностях. В результате трехмерное пространство отображается искаженно, особенно при больших полях наблюдения, сравнимых с полем зрения человека.

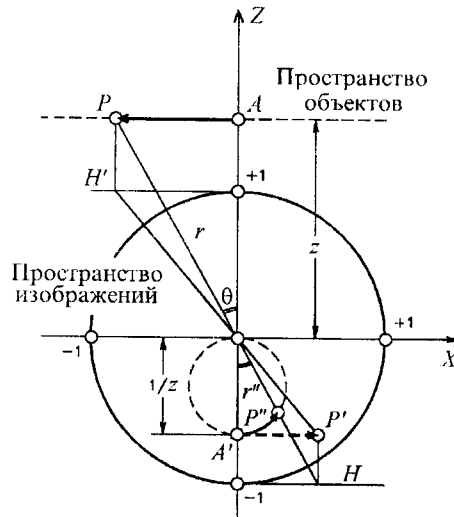


Рис. 7

Линейность пространства изображений является, с одной стороны, достоинством линейной перспективы, позволяющим создавать высокоэффективные алгоритмы синтеза изображений, но, с другой стороны, — недостатком, исключающим возникновение перцептивного механизма константности величины и связанного с ним эффекта «обратной» перспективы, что приводит к искаженному, чрезмерно увеличенному изображению предметов на малых расстояниях.

Нелинейная перспектива по Б. В. Раушенбаху, сконструированная специально для учета механизма константности величины, страдает рядом недостатков: нарушением интерпозиции объектов, неизотропностью проективного преобразования, неоднозначностью его выбора, ограниченностью применения статических изображений.

Альтернативой *плоским* поверхностям в евклидовом пространстве являются *сферические* поверхности, на которых возможно движение проекций объектов без деформации с тремя степенями свободы.

Центральная проекция пространства на сферу, или сферическая перспектива, наиболее полно удовлетворяет физиологии и психологии зрительного восприятия. Сферические изображения не имеют геометрических, интерпозиционных и яркостных (цветовых) искажений. Сферическая перспектива обеспечивает большие поля наблюдения, перекрывающие поле зрения человека, неискаженно воспроизводит объекты на малых расстояниях из-за проявления механизма константности угловых величин и эффекта «обратной» перспективы, инвариантна основному движению глаза — вращению, может учитывать глубинно-фокусные вариации взгляда при аккомодации. Линейная перспектива является лишь предельным случаем сферической при уменьшении поля зрения до рабочего, или фовеального.

Таким образом, на наш взгляд, на смену плоскости и линейной перспективы для новой компьютерной среды коммуникации — *виртуальной реальности* — должна прийти сферическая поверхность и сферическая перспектива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ellis S. R. Nature and origins of virtual environments: a bibliographical essay // *Comput. Syst. Eng.* 1991. 2, N 4.
2. Ковалев А. М., Талныкин Э. А. Машинный синтез визуальной обстановки // *Автометрия.* 1984. № 4.
3. Алешин В. И., Афанасьев В. О., Галис Р. М. и др. Виртуальная реальность. Проблемы освоения новой информационной технологии // *Программные продукты и системы.* 1994. № 4.
4. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.—Л.: Машиностроение, 1960.
5. Ньюмен У., Спрулл Р. Основы интерактивной машинной графики. М.: Мир, 1976.
6. Белого И. В., Некрасов Ю. В., Романовский А. В., Тарасов Ю. В. Программная система для разработки виртуальных сред на персональной ЭВМ // *Автометрия.* 1996. № 2.
7. Раушенбах Б. В. Пространственные построения в живописи. Очерк основных методов. Приложения 1—9. М.: Наука, 1980.
8. Кравков С. В. Глаз и его работа. М.—Л.: АН СССР, 1950.
9. Гиппенрейтер Ю. Б. Движения человеческого глаза. М.: МГУ, 1978.
10. Моторные компоненты зрения: Сб. статей. М.: Наука, 1975.
11. Лобачевский Н. И. Сочинения по геометрии. Т. 1. М.—Л.: Изд. техн.-теор. лит., 1946.
12. ABC der Optik /Herausgegeben von K. Mutze. Leipzig: Verlag T. A. Brockhaus, 1961.
13. Глезер В. Д. Зрение и мышление. Л.: Наука, 1985.

Поступила в редакцию 18 июля 1996 г.