

*Б. К. ЛОПАТЧЕНКО*, канд. техн. наук,  
*И. В. ШУЛЬГИН*, канд. техн. наук

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИНОКУЛЯРНОГО ВОСПРИЯТИЯ ПРОСТРАНСТВА

Восприятие трехмерного мира принято называть глубинным зрением [1]. В этом процессе участвуют бинокулярные и монокулярные механизмы. При монокулярном восприятии трехмерное физическое пространство отображается в двумерное субъективное пространство, называемое полем зрения, имеющее эвклидову структуру [2].

При монокулярном наблюдении работают как анатомо-физиологические механизмы (ретинальные, аккомодационные [3, 4] и т. д.), так и психологические (учет размеров известных нам предметов, законов линейной перспективы, воздушной дымки и др.).

Отсутствие психологических факторов резко снижает способность монокулярного зрения к различению глубины. В указанной ситуации при бинокулярном наблюдении зрение сохраняет способность к оценке пространственных отношений с достаточно высокой точностью. Очевидно, роль второго глаза в пространственной ориентации очень велика. Бинокулярный механизм помогает наблюдателю формировать правильный образ физического мира. Однако адекватность субъективного образа физическому миру стимулов имеет свои границы.

При бинокулярном восприятии объектов и отсутствии отмеченных выше психологических факторов субъективное зрительное пространство довольно сильно отличается от пространства стимулов. Это может существенно затруднить ориентацию человека.

Изучение механизмов бинокулярного восприятия человеком пространства начал еще Г. Гельмгольц, который [5] обнаружил, что прямым линиям в восприятии в общем случае соответствуют кривые линии в физическом пространстве.

Эти опыты состояли в следующем. В затемненной комнате на уровне глаз и на расстоянии 1—2 м от наблюдателя размещался ряд светящихся точек таким образом, чтобы они казались ему расположенными строго на прямой во фронтальной плоскости. Выстроенная таким образом линия, если смотреть на нее сверху, уже не является физически прямой. Степень ее кривизны зависит от расстояния до наблюдателя, от свойств объекта, имитирующего светящуюся точку, и от индивидуальных констант наблюдателя (рис. 1, а). Однако для любого нормального наблюдателя в данных условиях проведения эксперимента существует область расстояний, для которых физическая изогнутость линии обращена на наблюдателю (причем, чем бли-

же расстояние, тем больше вогнутость). Существует также ограниченная область расстояний, для которой субъективно прямая линия является и физически прямой, а за этой областью следуют расстояния, для которых субъективно прямая линия физически имеет выпуклость.

Хорошо известно еще одно явление. Физически параллельные линии, например, рельсы железной дороги наблюдатель видит сходящимися в отдалении. Хиллебранд [6] экспериментально определил форму линий, которые воспринимаются как

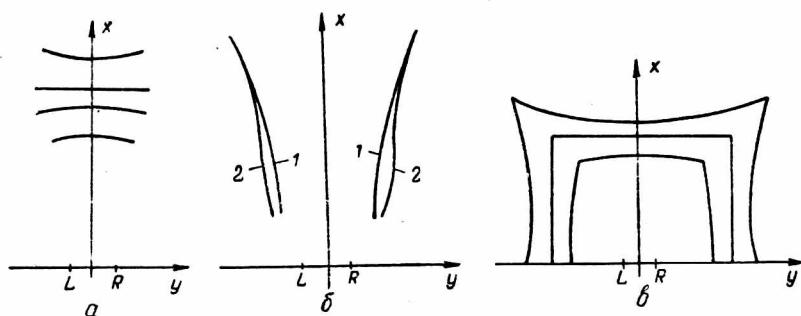


Рис. 1. Экспериментальные кривые: а — Гельмгольца; б — Хиллебранда и Блюменфельда (1 — параллельные линии; 2 — эквидистантные); в — комнаты Эймса.

параллельные. Получившиеся в результате эксперимента физические кривые являются сходящимися при приближении к наблюдателю и имеют характерную форму, похожую на гиперболу (рис. 1, б).

Блюменфельд [7] повторил опыты Хиллебранда, внося новый элемент в методику их проведения. Оставляя наиболее удаленные пары точек в одном и том же положении, Блюменфельд предлагал наблюдателям разместить другие пары точек так, чтобы создавалось зрительное ощущение их эквидистантности, т. е. чтобы расстояния между точками каждой пары казались одинаковыми. Затем опыт повторяли с другой парой точек. В результате участники опыта разместили точки так, что они образовали две аллеи, идущие к наблюдателю. При экспериментах Хиллебранда и Блюменфельда обнаруживается, что источники света лежат на кривых, но результаты экспериментов различны (рис. 2). Кривые параллельных рядов больше сходятся у глаз наблюдателя и лежат внутри кривых эквидистантных рядов. Этот парадокс явился первым аргументом в пользу неевклидовой природы субъективного зрительного пространства.

Интересны также эксперименты Эймса [8, 9], который изучал зависимости между зрительным и физическим пространством. Наблюдателю предъявлялась группа искаженных ко

нат, которые казались ему неотличимыми от первоначальной прямоугольной комнаты (рис. 1, в).

Свести многочисленные экспериментальные данные в единую теорию стремились многие исследователи. Вопрос о собственной структуре зрительного пространства рассматривался Герингом, Мюллером, Фон Штернеком и др. Гюнтер [10] разработал так называемую «функцию восприятия», которая количественно описывала некоторые явления восприятия в зрительном пространстве. Эта функция получалась в результате решения дифференциальных уравнений, составленных для характерных точек физического пространства зрения на основе некоторых психологических условий пространственного восприятия.

Важным шагом вперед в создании теории восприятия пространства явилась работа Р. Люнебурга [11]. При построении своей теории он воспользовался экспериментами Гельмгольца, Хиллебранда, Блюменфельда и Эймса. Нарушение аксиомы параллельности Евклида побудили Люнебурга предположить, что зрительное пространство представляет собой пространство Римана постоянной кривизны.

Люнебург намеревался путем определенных экспериментальных построений установить знак кривизны зрительного пространства. Для создания специальной математической теории Люнебург выдвинул три гипотезы:

1. Кажущаяся удаленность зрительных объектов определяется исключительно конвергенцией. Равным углом конвергенции соответствует равная зрительная удаленность.

2. Геометрическое место точек постоянного угла конвергенции, так называемый математический гороптер или окружность Вьет-Мюллера, является прообразом эгоцентрической окружности, т. е. окружности, центр которой совпадает с воображаемым монокулярным глазом, расположенным между двумя анатомическими глазами.

3. Вид раздражителя не оказывает никакого влияния на зрительную удаленность.

Люнебург предполагал, что зрительное пространство можно характеризовать как метрическое пространство, т. е. каждой паре точек  $P_1$  и  $P_2$  зрительного пространства может быть поставлено в соответствие неотрицательное число, которое измеряет воспринимаемое расстояние между точками. На основании ряда аксиом вводится психометрическая функция расстояния  $D(P_1, P_2)$ , определяющая метрику в субъективном зрительном пространстве, которая выражается следующей формулой:

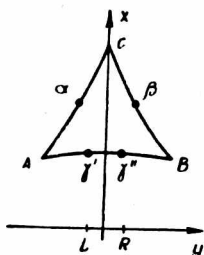
$$\frac{2}{(-K)^{\frac{1}{2}}} \sin \left[ \frac{1}{2} (-K)^{\frac{1}{2}} \frac{D}{C} \right] = \frac{[(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\eta_1 - \eta_2)^2 + (\zeta_1 - \zeta_2)^2]^{\frac{1}{2}}}{\left[ \left(1 + \frac{K}{4} \rho_1^2\right) \left(1 + \frac{K}{4} \rho_2^2\right) \right]^{\frac{1}{2}}},$$

где  $\rho_n^2 = \xi_n^2 + \eta_n^2 + \zeta_n^2$ ;  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$  — декартовы координаты в евклидовом пространстве;  $K$ ,  $C$  — константы, определяемые из опыта.

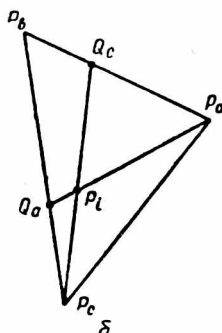
Устанавливая соотношения между субъективными координатами образа точки  $P(\xi, \eta, \zeta)$  и физическими координатами точки  $P^*(x, y, z)$  и используя приведенные выше опыты, было показано, что константа  $K < 0$ . Это позволило Люнебургу сделать вывод о том, что зрительное пространство является не евклидовым, а римановым пространством с постоянной отрицательной кривизной.

Большинство дальнейших исследований в этом направлении в основном развивали идеи Люнебурга.

А. Бланком [12] разработана система аксиом, из которых



а



б

Рис. 2. Эксперимент Бланка (а) и эксперимент Фоли (б).

естественным образом вытекают метрические свойства зрительного пространства. Аксиомы основаны на способности наблюдателя сообщать о восприятии таких элементарных категорий, как равенство расстояний, прямолинейность и перпендикулярность. Неожиданно отметить, что все введенные аксиомы могут быть проверены экспериментально. Сюда относятся аксиомы конечности, локальной евклидовости и др.

Бланк экспериментально проверил свойства средней линии треугольника. Построения проводились с помощью точечных источников света на уровне глаз наблюдателя. Наблюдатель видит три источника света  $A, B$  и  $C$  (рис. 2, а), которые сохраняются фиксированными на протяжении всего эксперимента. Четвертый источник  $\alpha$  вводится слева от наблюдателя и перемещается экспериментатором по командам испытуемого до тех пор, пока последний не увидит его лежащим на середине отрезка  $AB$ . Затем этот источник гасится и справа вводится пятый источник  $\beta$ , который аналогично помещается на середине отрезка  $BC$ . После этого испытуемому предлагается поместить новый источник  $\gamma'$  на отрезок  $AC$  таким образом, чтобы  $A\gamma' = \alpha\beta$  и  $C\gamma' = \alpha\beta$ . Если в эксперименте отрезок  $\gamma'\gamma'' > 0$ , знак кривизны отрицательный, если  $\gamma'\gamma'' < 0$ , знак положительный.

Средняя линия треугольника кажется наблюдателю меньше половины основания, что является характерным признаком метрики Лобачевского.

Интересна работа математика Г. фон Шеллинга [12]. Он рассмотрел применимость своей теории введения расстояний в аффинной геометрии  $n$ -мерного пространства к метрике нулевого зрения. Результаты его работы подтверждают

новную мысль Люнебурга о неевклидовости зрительного пространства.

Эксперименты Д. Фоли [14] по проверке свойства Дезарга в зрительном пространстве также подтверждают тезис о неевклидовой структуре зрительного пространства. В его экспериментах проверялась следующая аксиома. Если точка  $Q_a$  лежит на прямой линии между  $P_a$  и  $P_c$ , а точка  $Q_c$  на прямой линии между  $P_a$  и  $P_b$  (точки  $P_a, P_b, P_c$  неколлинеарны), то имеется единственная точка  $P_i$ , которая находится на прямой линии между  $Q_a$  и  $P_c$  (рис. 2, б). Другими словами, если две вершины треугольника соединены отрезками с противоположными сторонами, отрезки пересекаются. В таком пространстве любые три неколлинеарные точки определяют плоскость. Плоскость является двумерным подмножеством пространства, которое вместе с метрикой образует выпуклое конечно-компактное метрическое пространство.

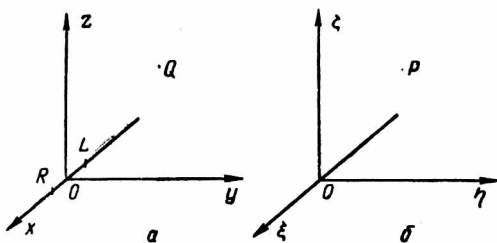


Рис. 3. Координатные системы в физическом и субъективном пространстве.

Эта аксиома вместе с аксиомой о локальной евклидовости заменяет предположение о свободной подвижности. Наличие свойства локальной евклидовости означает, что пространство является римановым. Метрическое, выпуклое, конечнокомпактное, дезаргово и риманово пространство является частью пространства постоянной кривизны, т. е. евклидовым, гиперболическим или эллиптическим. Математическая разработка, на которой основываются эти теоремы, была дана Буземаном [15]. В работе Зимана [16] вводятся специальные толерантные пространства для описания субъективных зрительных образов, элементы в которых связаны отношением толерантности (симметричность и рефлексивность).

Значительное число работ — Гарди, Заячковой, Бланка, Фоли, Шипли, Маррисона, Кинли и других — было посвящено экспериментальной проверке упомянутых теорий нахождения конкретного вида функции отображения физического пространства в субъективное, определению индивидуальных констант наблюдателя при бинокулярном восприятии. Большинство этих экспериментальных исследований основываются на специальной теории Люнебурга.

В физическом пространстве вводится декартова система координат (рис. 3)  $R$  и  $L$  — центры вращения глаз ( $y = \pm 1$ ). Плоскость  $xy$  — горизонтальная плоскость,  $yz$  — фронтальная плоскость,  $xz$  — вертикальная саггитальная плоскость. Центр

координатной системы  $O$  расположен на середине отрезка, соединяющего центры вращения глаз.

В субъективном зрительном пространстве этой координатной системе соответствует система  $\xi, \eta, \zeta$  (рис. 3, б). Для дальнейшего описания требующихся отношений Люнебург вводит физическом пространстве специальную бинокулярную систему координат (рис. 4, а). Каждая точка физического пространства зрения  $Q$  характеризуется тремя координатами: углом воззвшения  $\Theta$ , углом конвергенции  $\gamma$  и биполярной широтой  $\varphi$ .

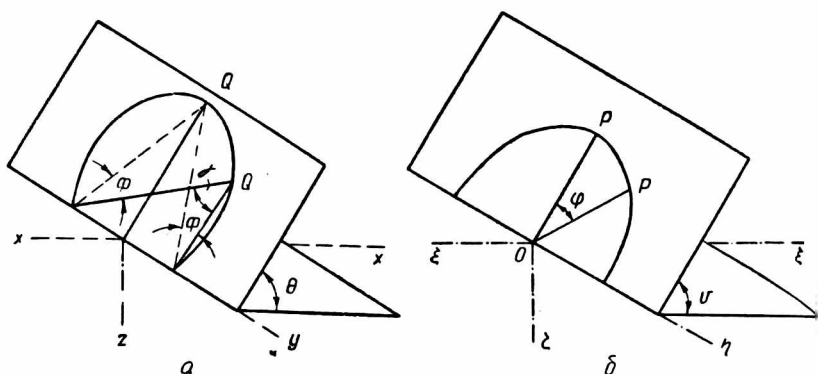


Рис. 4. Бинокулярная система координат Люнебурга в физическом пространстве и полярная система координат Люнебурга в субъективном пространстве.

Можно сказать, что бинокулярному наблюдению в физическом пространстве соответствует кажущееся монокулярное наблюдение из единственной точки, так называемого эгоцентра. Эгоцентр восприятия естественно принять за начало полярной системы координат для зрительного пространства (рис. 4, б).

Точке  $Q$  физического пространства соответствует в субъективном зрительном пространстве точка  $P$  с полярными координатами  $\nu, \rho, \varphi$ , где  $\rho$  описывает воспринимаемое радиальное расстояние, а  $\varphi$  — воспринимаемый азимутальный угол (значение  $\varphi = 0$  приписывается направлению, устремленному сагиттально вперед). Задача отыскания вида отображения состоит в определении зависимости  $\rho = f(\gamma)$ . Люнебург на основе некоторых эмпирических результатов предложил искать эту функцию в виде  $f(\gamma) = 2e^{-\sigma\gamma}$ , где  $\sigma$  — величина, характеризующая особенности восприятия глубины у данного субъекта.

Исследования Люнебурга и других экспериментаторов опираются, таким образом, на положение о том, что бинокулярное зрение преобразует группу так называемых окружностей Вет-Мюллера  $\gamma = \text{const}$  в группу субъективных концентрических окружностей  $\rho = \text{const}$ . Люнебург утверждает также, что отображение конформно.

Однако окружности Вьет — Мюллера, которые в своих узловых точках пересекаются с глазами, представляют собой не гиперболический, а так называемый эллиптический пучок окружностей. Но известно, что не существует отображения гиперболического пространства на евклидово, в котором концентрическая группа окружностей определяется как эллиптическая. Гипотеза о том, что окружности Вьет — Мюллера являются отображением концентрических окружностей расстояний, несовместима с положением о том, что видимое пространство имеет гиперболическую структуру.

Необходимо отметить еще одно обстоятельство, упускаемое из виду Люнебургом и его последователями. В экспериментах с аллеями Хиллебранда — Блюменфельда отчетливо виден интервал дистанций, на котором «аллеи равных расстояний» имеют эллиптическую выпуклость, обратную искривлению параллельных аллей, что хорошо видно на диаграммах, приведенных Заячковой [17]. Последователи Люнебурга обычно не принимают во внимание эти отклонения от глобального искривления аллей на большом интервале дистанций. Между тем «аномальный» с их точки зрения интервал простирается до расстояний 1,5—2 м. В этом интервале верна основная теория Люнебурга о гиперболичности пространства, но его частная теория о конкретной функции отображения имеет наибольшие погрешности. Работы Кинле [18] по определению вида отображения с помощью экспериментов над группами концентрических окружностей приводят его к следующему выводу. Отображение в области бинокулярного пространства на небольшом расстоянии от наблюдателя может быть описано с помощью модели Пуанкаре. Частная теория Люнебурга в этой области, по мнению автора, противоречит его общей теории. Кинле выражает сомнение в том, что можно описать большую область видимого пространства, используя какую-либо геометрическую модель, так как центр отображения, по мнению автора, не связан с фиксированной точкой.

Гюнтер в теории бинокулярного восприятия [10] выделяет определенные дистанции: «расстояние для чтения» и «расстояние для наблюдения». Гиперболическая структура видимого пространства вытекает у него из первого расстояния. Различие в восприятии для этих расстояний автор видит в различной роли глазных мышц.

Таким образом, данные, приведенные в большинстве указанных работ, подтверждают положение о неевклидовом характере зрительного пространства. Однако они не в состоянии охватить многие наблюдаемые в экспериментах феномены.

Список литературы: 1. Коробко Б. Г. Глубинное зрение. Симферополь, Крымиздат, 1946. 220. с. 2. Шульгин И. В. Исследование метрических свойств поля зрения. — В кн. Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, 1972, с. 105—115. 3. Авер-