

А. И. КОГАН, Г. В. БУРЫЙ, М. З. ОСТРОМОУХОВ

К ТЕОРИИ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

(Представлено академиком Г. М. Франком 12 II 1972)

Известен ряд условий, обеспечивающих зрительное восприятие движения объекта, но теории, удовлетворяющей этим условиям, не существует (³, ⁵, ⁷) Единственное теоретическое положение, которое, по-видимому, является общепринятым, заключается в следующем: если в течение некоторого времени непрерывно воспринимается (физически равномерное и прямолинейное) движение объекта, то, значит в течение этого времени в зрительные центры мозга наблюдателя поступает с периферии зрительного аппарата сигнал, коррелирующий с изменением позиции объекта в пространстве относительно наблюдателя.

Выдвигаются два альтернативных объяснения природы центростремительного сигнала, обеспечивающего восприятие: 1) глаза наблюдателя движутся в соответствии с перемещением объекта; перераспределение тонуса в мышцах глаз («проприоцепция») порождает сигнал, обеспечивающий восприятие движения объекта (⁸); эту схему обозначим гипотеза 1; 2) изображение объекта перемещается по сетчатке глаза, — это порождает сигнал, соответствующий фронтальной составляющей движения; оба глаза функционально объединены, и на «сетчатке циклопического глаза» возникает разность монокулярных сигналов («диспаратность»), соответствующая разности расстояний до двух объектов наблюдения (⁶) или изменению расстояния до одного и того же объекта — при условии, что в бинокулярной системе сравниваются последовательные во времени позиции изображений объекта (наше дополнение); эту схему обозначим гипотеза 2.

В описываемых ниже экспериментах промоделирована одна из простейших зрительных задач: восприятие «точечного» светлого объекта, перемещающегося в темном пространстве вдоль оси z по отношению к наблюдателю. Основная цель работы: проверка теоретического положения о необходимости центростремительного сигнала, коррелирующего с реальными параметрами движения объекта, а также проверка обеих гипотез о природе этого сигнала.

Наименее изучен принципиально важный случай восприятия движения, характеризующегося как фронтальной, так и радиальной («глубинной») составляющими, причем необходимо, чтобы объект мог считаться точечным, т. е. при его движении не должны физически меняться угловые размеры, яркость, форма; необходимо также отсутствие других ориентиров в поле зрения. Ситуация описываемых экспериментов близка к «чистой» и потому позволяет осуществить проверку обеих гипотез.

Результаты проверки заставляют нас безоговорочно отклонить первую гипотезу, модифицировать вторую и, главное, радикально изменить основное положение теории восприятия движения.

Аппаратура и методика. На экране ЭЛТ (47-ЛК-2Б), встроенной в индикатор ИМ-789, представляются две равнояркие «точки»; вначале они расположены симметрично относительно вертикальной оси, делящей экран пополам. Точки находятся на одной горизонтальной прямой; изменение расстояния между ними — вдоль этой прямой — осуществля-

ется с помощью генератора пилообразного напряжения со скоростью, варьирующей в пределах от 0,5 до 100 см/сек. После каждого старта расстояние сначала уменьшается (увеличивается) до заданного предела с постоянной скоростью (фаза 1), а затем расстояние между точками резко, со скоростью примерно в сто раз большей, увеличивается (уменьшается) до исходного (фаза 2). Движение может быть задано каждой точке отдельно. Испытуемый (И.) наблюдает точки с помощью зеркального стереоскопа (базис 206 мм) с расстояния около 1,5 м. Изображение «левой» точки, на всем пути ее движения, проецируется только в левый глаз, изображение «правой» точки — в правый глаз. При нормальном бинокулярном зрении



Рис. 1

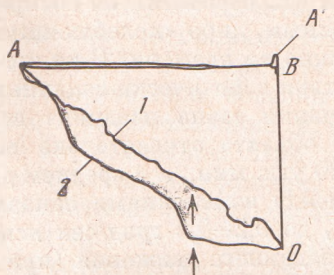


Рис. 2

Рис. 1. Рефлекторное прослеживание движущегося стереобъекта. (Фото с экрана осциллоскопа. Развертка стимула — по горизонтальной оси, развертка движения глаза — по вертикальной оси, одновременное движение стимула и глаза — сумма сигнала, — диагональ.) ОА — фаза 1; $v_{ст} = 4,8$ мин/сек, АВО — фаза 2; $v_{ст} = 6$ град/сек. В фазе 1 зрительная ось колеблется около упорядоченной составляющей движения — аналогично известному «физиологическому нистагму» при фиксации неподвижной точки

Рис. 2. Совмещение двух записей при воспроизведении с магнитофона. 1 — $v_{ст} = 0,4$ град/сек в фазе 1, $v_{ст} = 20$ град/сек в фазе 2; 2 — $v_{ст} = 4$ град/сек в фазе 1, $v_{ст} = 420$ град/сек в фазе 2. ОА — фаза 1 (для глаза окончание в А'); АВ — фаза 2 (стимул); А'О — фаза 2 (глаз). Средняя скорость прослеживания в фазе 1 близка к $v_{ст}$ в обоих случаях (1, 2), но запаздывание в момент, отмеченный стрелкой, составило 48 угл. мин. в случае 2 и только 2,5 угл. мин. в случае 1

И. всегда видит одну точку — стереобъект, который субъективно раздваивается только при слишком быстром перемещении точек на экране ЭЛТ. Изменение расстояния между точками всегда вызывает произвольные движения глаз («рефлекторное прослеживание»); уменьшение расстояния вызывает рефлекторную конвергенцию, увеличение расстояния — дивергенцию. Максимальное изменение угла конвергенции в опытах $13,5^\circ$. Задавалось как симметричное, так и асимметричное изменение этого угла; в последнем случае амплитуда изменения составляла $4,2^\circ$. Параметры движения объекта и глаза фиксировались одновременно на магнитной ленте и на бумаге. Как правило, регистрировались движения левого глаза (с помощью яббусовской присоски⁽⁴⁾ и электромагнитного датчика⁽²⁾) при асимметричной конвергенции и дивергенции; точка, видимая правым глазом, оставалась неподвижной на экране ЭЛТ*. В опытах, которые были хорошо воспроизводимы, участвовало 10 наблюдателей с нормальной (или скорректированной до нормы) остротой зрения и нормальным бинокулярным (стереоскопическим) зрением. Угловая скорость движения стимула ($v_{ст}$) варьировалась в диапазоне от 0,04 до 5,2 град/сек в фазе 1 (16 градаций) и от 6 до 420 град/сек в фазе 2 (5 градаций). В программу были также включены контрольные «старты»: после обычного сигнала

* Специально проведен контроль поведения глаза, отслеживающего неподвижную точку; сопоставлено моно- и бинокулярное прослеживание.

о начале опыта расстояние между точками оставалось неизменным. Все устные отчеты И. фиксировались на магнитную ленту.

Ожидаемые результаты. В соответствии с гипотезой 1 надо ожидать, что изменение расстояния до объекта будет воспринято, когда угол конвергенции изменится на достаточную (надпороговую) величину. По гипотезе 2 изменение расстояния будет восприниматься только в том случае (и в течение всего времени), когда изображение объекта будет перемещаться по сетчатке (т. е. глаза не будут успевать проследживать объект).

Фактические результаты. При медленном изменении расстояния между точками на экране ЭЛТ ($v_{ст}$ от 0,04 до 0,16 град/сек) заданное движение стереобъекта не воспринимается вовсе. Объект кажется либо неподвижным, либо «колеблющимся» неупорядоченно по направлению и непостоянно во времени. В то же время угол конвергенции изменяется в соответствии с физически заданным движением объекта (рис. 1). Мгновенные значения «запаздывания» глаза (характеризующие смещение изображения объекта относительно центральной ямки сетчатки) колеблются от 0 до 20 угл. мин., а в среднем для 10 измерений с 10-секундным интервалом между измерениями запаздывание составило 6,5 мин. При увеличении $v_{ст}$ до 0,2–0,3 град/сек ясно воспринимается фронтальная составляющая заданного движения (при асимметричном изменении расстояния), а когда $v_{ст}$ достигает 0,5 град/сек и более, отчетливо воспринимается также «глубинная» составляющая движения: стереобъект движется в трехмерном пространстве в соответствии с физически заданной характеристикой движения. Во всех случаях средняя скорость рефлекторного проследживания близка к скорости стимула (рис. 2), а средняя величина мгновенного запаздывания ($l_{ср}$) имеет один и тот же порядок; даже при $v_{ст} = 1,5$ град/сек, — когда все испытуемые воспринимали «очень быстрое» приближение (удаление) объекта, — $l_{ср}$ варьировала в пределах 2–20 мин. у разных испытуемых. Отличить объективно те значения $v_{ст}$, при которых движение воспринимается, позволяет только величина, характеризующая изменение позиции изображения на сетчатке (Δl) за период латентного времени (l_r) между началом движения стимула и началом рефлекторного проследживания. Удалось измерить t_r только при скорости стимула более 0,4 град/сек.; $t_r = 200$ мсек ($\sigma = \pm 30$ мсек.). По истечении t_r глаз начинает двигаться всегда в верном направлении и, двигаясь с ускорением еще на протяжении 150–200 мсек., настигает стимул или, во всяком случае, существенно сокращает запаздывание*. Пороговая скорость восприятия движения во фронтальной плоскости составила 8–10 мин/сек (что соответствует известным данным⁽⁷⁾); пороговая скорость восприятия движения объекта в глубину равна 20–30 мин/сек (по видимому, измерено впервые)**.

Обсуждение. Рассмотрим процессы проследживания и восприятия раздельно. Такой подход допустим, поскольку однозначно установлено, что проследживание не сопровождается восприятием перемещения объекта в пространстве, когда ретинальные изображения объекта с начала до конца сохраняют приблизительно постоянное положение на сетчатке. Классическая схема, выводящая восприятие внешнего движения из проприоцепции (гипотеза 1), явно неверна. При проследживании глаз настига-

* Исключая лишь те случаи, где стереобъект «окончательно расщепляется надвое», это наблюдалось в наших опытах при $v_{ст}$ более 4–6 град/сек; продолжительность движения стимула с такой скоростью была не более 1 сек.

** Заметим, что термин «пороговая скорость» не имеет смысла по отношению к процессу проследживания; стимулом последнего является, очевидно, «увод» изображения из зоны фиксации, не ограниченный минимумом скорости. Изменение угла конвергенции имеет только один выход в восприятие: известный эффект кажущегося изменения размеров (и яркости) объекта, — что в реальных условиях способствует константности восприятия этих параметров.

ет стимул; это значит, что импульс, посылаемый к мышцам глаз в любой момент t_n пропорционален не только той величине запаздывания, которая имела место в момент t_{n-1} , но и ожидаемому приросту запаздывания за следующий интервал времени. Это полностью соответствует схеме Бернштейна ⁽¹⁾, в согласии с которой коррекция движения осуществляется на основе сигнала разности (Δw) между значением (Iw), реально присутствующим в данный момент, и значением (Sw) *, запрограммированным на данный момент. Для объяснения процесса прослеживания схема достаточна: возникновение запаздывания (сигнал Δw) приводит к такому изменению программы прослеживания, которое затем нивелирует сигнал. Но за счет чего воспринимается движение, когда запаздывание аннулировано и изображение объекта больше не движется по сетчатке **? Остается, очевидно, одна возможность: движение воспринимается за счет изменения программы. Введем величину $\Delta Sw/\Delta t$ и назовем ее «новизна программы». Оценим вероятное критическое значение новизны программы, т. е. то наименьшее изменение скорости прослеживания, при котором начинает восприниматься движение или его изменение. При латентном времени $t_r = 0,2$ сек. пороговое изменение позиции изображения составляет 2—4 мин. дуги. Наиболее вероятно, что считывание двух последовательных во времени позиций изображения ограничено интервалом 0,1 сек. (известная величина «инерции зрения»); соответственно, вероятное критическое значение новизны программы равно 1 — 2/0,1 (угл. мин/сек.). Вторую классическую схему, выводящую восприятие из перемещения изображения по сетчатке (гипотеза 2), следует модифицировать так: для запуска восприятия движения необходимо и достаточно, чтобы за критический интервал времени (около 100 мсек.) позиция изображения на сетчатке изменилась на критическую величину (порядка 1 — 2 угл. мин.).

Поскольку установлено, что для восприятия непрерывного движения не требуется непрерывного центростремительного сигнала, мы считаем возможной следующую гипотетическую формулировку основного положения теории восприятия движения: зрительно воспринимается неподвижный или линейно и равномерно движущийся объект, пока изменение скорости перемещения стимула на сетчатке не достигнет критического значения, равного новизне программы.

Это положение поддается проверке на феноменах стробоскопического движения, аутокинетического движения, на стереофеномене Пульфриха, на реальном движении в поле с ясно видимой структурой. Такая проверка нами начата.

Авторы искренне благодарны Л. А. Блюменфельду за ценное обсуждение.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт технической эстетики
Москва

Поступило
9 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Н. А. Бернштейн, Очерки по физиологии движений и физиологии активности, М., 1966, стр. 287. ² В. П. Зинченко, Н. Ю. Вергилес, Формирование зрительного образа, М., 1969, стр. 16. ³ Н. Б. Костелянец, Л. И. Леушина, В кн.: Физиология сенсорных систем, ч. 1, «Наука», 1971, стр. 304. ⁴ А. Л. Ярбус, Роль движений глаз в процессе зрения, «Наука», 1965, стр. 26. ⁵ In: Vision and Visual Perception, N. Y.—London, C. H. Graham (Ed.), 1966, p. 575. ⁶ E. Hering, Spatial Sense and Movements of the Eye, Baltimore, 1942, p. 49. ⁷ J. Hochberg, Experimental Psychology, N. Y.—London, 1971, p. 549. ⁸ C. S. Sherrington, Integrative Action of the Nervous System, 1906, p. 121.

* Iw от Istwert; Sw — от Sollwert (нем.); в данном случае, Iw — реальное, а Sw — ожидаемое положение изображения на сетчатке.

** С самого начала прослеживания, когда глаз догоняет стимул, изображение уже не уходит от центральной ямки, а движется ей навстречу; между тем по-прежнему воспринимается движение объекта в том же направлении.