

# 体视图及其计算机生成

秦克诚 陈熙谋 张克明

(北京大学物理系 北京 100871)



有多种方法从平面图片得到逼真的立体感,如全息照片、双筒体视镜、红绿体视图、立体电影、三维幻视图等。除了全息照片是在重现时通过衍射重现出真实存在的物光波之外,其他方法都是利用双眼的视差效应,原理大同小异。本文先讨论引起视觉立体感的原因,再从统一的观点介绍常见的几种体视图的原理,特别是红绿体视图和三维幻视图,这两种图都可以通过简单的算法用计算机生成。

## 一、引起视觉立体感的原因

视网膜上生成的像是二维的,我们看到的却是一个三维世界。这是什么原因?引起视觉立体感(即远近纵深的感觉)有许多物理、生理和心理因素,例如物体所张视角的大小、遮掩关系、照明和阴影、聚焦时晶状体周围肌肉的紧张程度等。不过,产生远近感觉最主要的原因是双目视差。把双目视差记录在平面图片上,就做成了体视图。体视图本身是二维的,上面只记录了关于视差的信息,观看时却能产生逼真的立体感,这是立体视觉来源于双目视差的有力证明。

什么是双目视差?由于左右两眼的空间位置不同,同一立体景物在左眼和右眼中所成的

像也有差异。如图1所示, $L$ 和 $R$ 分别代表左眼和右眼, $PSQ$ 是一块平行于观看者面部的透明片(就用它来制作体视图), $PQ \parallel LR$ , $S$ 和 $T$ 在 $LR$ 的中垂线上。若眼睛对透明片对焦,那么 $P$ , $T$ , $Q$ 三点在左眼所成的像为 $PT_1Q$ , $T$ 的像点 $T_1$ 比较靠近 $P$ 点;右眼看到的像为 $PT_2Q$ , $T$ 的像点 $T_2$ 更靠近 $Q$ 点。(这里所说的像同左右眼膜上实际生成的像既相互对应又有区别。在视网膜上, $T$ 的像是散焦的,而这里 $T_1$ 和 $T_2$ 只是 $T$ 的投影点,没有考虑散焦。也就是说,体视图只记录视差而不记录别的信息)。下面我们吧体视图上记录的这两个像分别叫作左眼像和右眼像,并称同一物点在左眼像和右眼像中的像点 $T_1$ 和 $T_2$ 互为共轭点。透明片(即眼睛对焦的某个参照距离)上的物点(例如 $S$ )的像点就是物点自身,二共轭点重合,没有视差;不在参照距离上的物点,在左眼像和右眼像中产生的像点不同。远于参照距离的物点,其像点和对应的眼睛处于同侧;近于透明片的物点,双眼与对应的二共轭点处于异侧(图2)。双目视差就体现

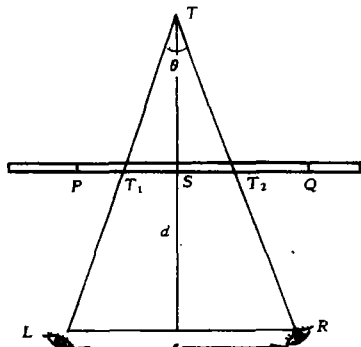


图 1

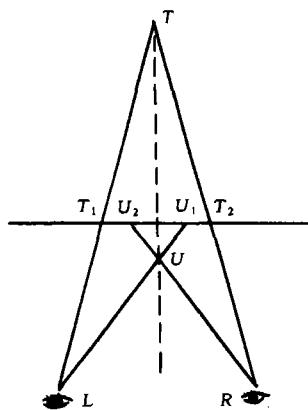


图 2

在左眼像和右眼像中二共轭点的相对位置不同,而这是由对应的物点的远近不同引起的。

双眼的视差包含有关于三维空间立体感觉的种种信息。一个明显的例子是,观看一个立体图形时,左、右眼能分别看到立体的不同侧面。视差也包含了空间各点的视线角、空间各点离双眼的纵深距离的信息。所谓视线角(Angle of Sight)是两眼对视场中央附近的空阔一点所张的角,亦即如果两眼注视该点,两眼视线(即晶状体光轴)所成的角,如图1中的 $\angle LTR$ 就是T点的视线角。显然,视线角就是左右眼与相应的共轭点的连线(图1中的 $LT_1$ 和 $RT_2$ )或其延长线的交角。这个角直接给出物点离双眼的距离,因为

$$\theta = \angle LTR = 2\arctan(e/2d)$$

其中 $e$ 为左眼和右眼的瞳距,对每个观看者是固定的,约为6~7cm; $d$ 为物点T到双眼的距离, $\theta$ 的大小完全由 $d$ 决定。我们观看三维景物时,并不需要对视场中景物上的每一点进行扫描以实际测定其视线角,却仍然感到景物是立体的,远近不同,这是因为视线角的信息已包含在左眼像和右眼像的视差中了。

立体视觉的视差理论认为,产生立体视觉的关键是左、右眼分别看到两幅有视差的像。大脑神经把这两幅像重叠在一起,进行相关运算,力图把两个共轭点认同为同一点,以合成统一的一幅空间图像,结果就恢复了物体在纵深方向上的信息,即立体感。更具体地说,在观看时,两眼注视景物上的某一点 $S_0$ (在正常的观看方式下,两眼总是注视景物上同一点,见下)。这时两眼的眼球要向内转 $\theta/2$ 角( $\theta$ 是 $S_0$ 的视线角),相应产生的肌肉紧张程度这一生理效应就给予大脑有关该点离观看者距离 $d_0$ 的信息, $d_0$ 是一个参照距离,此时双眼自动对 $S_0$ 所在距离对焦。由于 $S_0$ 在两只眼睛晶状体的光轴上,因而同时处于左眼像和右眼像的视场中心,大脑神经将左右两个像叠合时以 $S_0$ 为基准点。对于两眼不注视的点,它在左眼像和右眼像中会有视差,即共轭点不重合。大脑作相关运算后,观看者便会感到这两个共轭点合成为三维空间中的一个像点,它相对于 $S_0$ 所在平面(参照平面)之距离为 $\Delta d$ , $\Delta d$ 之大小取决于视差的大小

(两共轭点的间距)。于是此像点离观看者的距离便是 $d = d_0 + \Delta d$ 。这样就在整个视场看到一幅立体图像。

从以上的讨论可知,产生视觉立体感是一心理过程,这一心理过程依据的信息是左眼像和右眼像的视差,而引发这一心理过程的物理保证则是要让左眼只看到左眼像,右眼只看到右眼像。把左眼像和右眼像记录在平面图片上就生成了体视图,而保证双眼分别看到不同的像的方法则有多种,不同的方法区别了不同的体视图。一种方法是使左眼像和右眼像在空间分开,不相重叠,用几何光学使双眼看到不同的像(双筒体视镜);另一种方法是使左眼像和右眼像在空间叠合在一起,再用物理光学的方法使二者分开,例如使两个像有不同的偏振方向或不同的波长(颜色),而观看者则戴上由不同检偏方向的偏振片或不同颜色的滤光片做的眼镜(立体电影和红绿体视图);还可以使左眼像和右眼像在空间错开一段距离(一个周期),利用图案的周期性,使左眼像和右眼像在空间位置虽有交叠但不混杂,而用诱导方法使两眼视图的不同部分(三维幻视图)。

将一幅已生成的体视图放在原来生成时的位置代替三维景物,并设法保证左眼只看到左眼像,右眼只看到右眼像。由于观看时输入的视差信息与观看原来的三维景物时完全一样,因此如果上述理论正确的话,大脑神经作相关运算后输出的三维图像也应当完全相同。由共轭点 $T_1$ 和 $T_2$ 得出的三维像点应当与真正的物点在同一位置(图1),即双眼与各自的共轭像点的连线 $LT_1$ 和 $RT_2$ 的交点。也就是说,从体视图看出三维像的过程是生成体视图的逆过程。

这里还要讨论一下人眼观看景物的方式,因为从不同的体视图看出立体像要用不同的观看方式。眼睛观看景物时有一个调节和适应过程。眼睛的调节包括两个内容。第一,转动眼球,使视线对准要观看的区域的中点(参照点)。前面说过,两个眼球的光轴所夹角度给出参照距离的信息。第二,眼球对参照距离聚焦,使这个距离所在的平面清晰成像在视网膜上。这二

者自动同步,但是是两个不同的调节内容.前者改变透镜光轴的方向,后者调节晶状体的曲率半径以改变透镜的焦距.对于普通物理光学教科书,由于不讨论立体视觉问题,在讨论眼睛的调节时通常只讲后者而不讲前者.但正是在这个被忽略的问题上,存在着不同的观看方式的可能性.对于正常的、习惯的观看方式(观看真正的三维景物时永远用这种方式),观看时两眼总是同时注视景物上的一点,即视线在这一点相交,两眼并自动对这一点所在的距离对焦,这个距离就是参照距离.但是,两只眼睛并不是非注视同一物点不可.在观看平面图片时,在一定条件的诱导下,两眼也可以分别注视图上不同的两点(具体地说,就是三维幻视图上相邻二周期中的共轭点,见后),并对这两点所在的平面对焦.从三维幻视图看出立体感就要用这种观看方式.在这种观看方式下,两眼的视线相交于平面图后的某点,因而视线角给出的参照距离不是平面图离观看者的距离,而是两眼视线交点离观看者的距离.因此,眼睛对焦的距离不是视线角给出的参照距离.从习惯的观看方式转到这种观看方式,必须经过一段训练和适应.两眼分别注视的两点相距越近,转到这种观看方式越容易.

## 二、立体电影和红绿体视图

立体电影在拍摄时用相距一定距离的两台电影摄影机模拟人的双眼.两台摄影机拍摄同一景物的像记录了视差.放映时,用两台放映机将这两个像经过方向互相正交的偏振片调制后同时投射到同一银幕上,银幕上有两个略有差异的偏振像重叠在一起.直接观看银幕,看到的模糊的双影像,没有立体感.必须戴上偏光眼镜观看,使两个像分开,左摄影机摄的像只能通过左边的检偏器进入左眼,而右眼通过方向正交的右检偏器只看到右摄影机所摄的像.这两个像经过视觉神经和大脑的相关运算,就产生逼真的立体感.

既然最终要将两个像分开,那么为什么又要将它们重叠在一起呢?这是为了迎合习惯的观看方式,使两只眼睛可以注视同一点(银幕中

心),两个像都处于视场之中.

也可以用别的物理手段代替偏振来分开两个像,例如用颜色.选两种互补色,例如红色和青色,在暗背景上画图.将同一个三维物体的左眼像和右眼像画在同一张图上,左眼像用红色画,右眼像用青色画,两像重叠处用白色画.双眼戴上有色玻璃做的眼镜观看,左眼镜为红玻璃,右眼镜为青玻璃,这样就可以使左眼只看到左眼像,右眼只看到右眼像.这种方法设备简单,而且这种体视图容易在计算机上生成.(也可以在亮背景上画图.若有色眼镜仍是左红右青,则此时左眼像当用青色画,右眼像当用红色画,两像重叠处用黑色画,眼睛看到的是亮背景上的黑色像.)

下面定量计算空间一点在计算机屏幕上的左眼像和右眼像.在计算机屏幕上建立坐标系, $x$ 轴水平向右, $y$ 轴向上.原点 $O$ 正对左眼 $L$ 和右眼 $R$ 之间的中点 $M$ ,距离 $OM = d_0$ ,两眼距离为 $e$ .于是 $z$ 轴由屏幕指向观看者,正 $z$ 值表示在屏幕前,负 $z$ 值表示在屏幕后. $T(x, y, z)$ 为空间一点.为简单起见,先考虑 $T$ 在 $xOz$ 平面内即 $y = 0$ 的情形(图3). $T$ 的左眼像为 $T_1(x_1, 0, 0)$ ,右眼像为 $T_2(x_2, 0, 0)$ ,二共轭点 $T_1$ 和 $T_2$ 的距离 $\Delta x = x_2 - x_1$

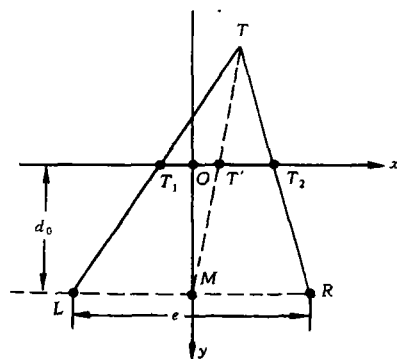


图3

由相似三角形 $TLR$ 和 $TT_1T_2$ ,得

$$\Delta x = -\frac{e \cdot z}{d_0 - z}$$

上式对正负 $z$ 值都成立.注意 $\Delta x$ 与 $z$ 的符号相反,即物点 $T$ 在屏幕后时, $z < 0$ ,此时 $\Delta x > 0$ ,左眼像在左,右眼像在右.反之, $T$ 在屏幕前, $\Delta x$

$< 0$ . 由相似三角形  $MPT$  和  $MOT'$ , 有

$$x' = \frac{xd_0}{d_0 - z}$$

$x'$  和  $T'$  的  $x$  坐标. 因此

$$x_{1,2} = x' \mp \frac{\Delta x}{2} = \frac{xd_0 \pm \frac{ez}{2}}{d_0 - z}$$

若  $T$  不在  $xOz$  平面内,  $y \neq 0$ , 以上诸式仍成立.  $T'$  的  $y$  坐标

$$y' = \frac{yd_0}{d_0 - z}$$

观看时产生立体感是以上过程的逆过程. 两个共轭点  $(x_1, y', 0)$  和  $(x_2, y', 0)$  复现出的三维像点就是原来的物点, 其坐标为

$$x = x'(d_0 - z) / d_0 \quad (x' = x_1 / 2 + x_2 / 2)$$

$$y = y'(d_0 - z) / d_0$$

$$z = -d_0 \Delta x / (e - \Delta x) \quad (\Delta x = x_2 - x_1)$$

于是, 以计算机屏面 ( $z = 0$ ) 为参照距离 (即  $d_0$ ), 将显出凹凸的三维图像. 因此, 这种方法又称为浮雕浮现过程 (Anaglyphic Process).

将两眼和两个共轭像点的对应关系反过来, 例如将红绿眼镜反戴, 使左眼看右眼像, 右眼看左眼像. 这相当于  $\Delta x$  变号, 因此  $z$  也变号, 凹凸关系反转. 原先凹下去的, 现在凸出来.  $\Delta x$  的绝对值越大,  $z$  的绝对值也越大 (凹凸的幅度越大).

若  $\Delta x$  有一系统误差, 例如立体电影放映时右眼像和左眼像在银幕上未能在基准点叠合, 而是有一误差  $\delta x$ , 情况又将如何? 此时二共轭点之间的距离

$$\Delta x_e = \Delta x + \delta x$$

因此, 三维像点的视觉距离

$$z_e = -\frac{d_0 \cdot \Delta x_e}{e - \Delta x_e} \approx -\frac{d_0 \cdot (\delta x + \Delta x)}{e - \Delta x} = z_0 + z$$

其中  $z_0 \approx -d_0 \cdot \delta x / e$ , 因此看到的仍是一幅三维图像, 只是参照距离移动了  $z_0$ . (这是因为, 现在在银幕上叠合的, 是本来相距  $-\delta x$  的两个共轭点.)

画图所用颜色同有色眼镜镜片的颜色和透光率要适当配合. 根据我们的经验, 在暗背景上

画图效果比在亮背景上画图好. 我们是选用亮红色 (颜色代码为 12) 和亮青色 (11) 在灰色 (8) 背景上画图, 二像重叠处用亮白色 (15). 眼镜片的颜色和透光率, 应使透过红色镜片只看到红色和白色, 青色与背景融为一体看不出来; 透过青色镜片只看到青色和白色, 红色融入背景.

### 三、三维幻视图

也可以不将一个立体景物在左眼像和右眼像在空间叠在一起, 而是让它们分离. 这时关键在于采用前面讲过的那种新观看方式, 即两眼不是注视画面上的同一点, 而是分别注视左眼像和右眼像的中点. 这种观看方式有违我们的习惯, 但经过一番训练后是能够做到的.

在讨论具体做法之前, 先看一下左眼像与右眼像在空间分离时的一些普遍结论. 如图 4, 右眼像与左眼像在空间相离一距离  $t > 0$ .  $t$  远大于一切共轭点之间的视差距离  $\Delta x$ , 因此各对共轭点之间的总距离  $\Delta x_t = t + \Delta x > 0$ , 所以看到的三维像的全部像点都在画面以远. 但  $t$  的大小也有一个限度. 为了视线能够相交, 必须  $t < e$ . 而且  $t$  越小, 转到这种新观看方式越容易.

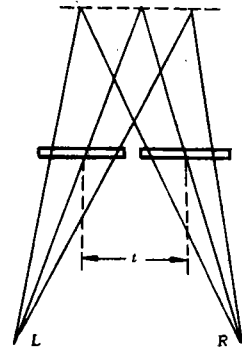


图 4

三维像像点的纵深距离

$$z = -\frac{d \cdot \Delta x_t}{e - \Delta x_t} \approx -\frac{d \cdot (t + \Delta x)}{e - t} = z_t - \frac{d \cdot \Delta x}{e - t}$$

其中  $d$  是左眼像和右眼像图片平面离观看者的距离,  $z_t = -d \cdot t / (e - t)$ . 因此, 参照面从图片平面移到图片以远  $|z_t|$  处, 看到的三维像是在这个基础上的凹凸. 若  $\Delta x = 0$ , 即左、右眼像没

有视差,那么原来的物应当是一张平面图片,看出的像也是一张平面图,没有凹凸,只是挪动了—个距离,如图4所示。

左眼像和右眼像在空间分离的原理最简单的体视装置是双筒体视镜,两只眼睛各经过一筒观看对应的单眼像图片。另外一种左眼像和右眼像在空间错开一段距离(但不完全分离)的体视图是三维幻视图,它的优点是观看时不需要任何辅助装置。这种图是用计算机生成的,前两年非常流行,制成招贴画、画册和明信片出售,在许多刊物上刊载,甚至印在某些国家的邮票上。本期杂志封4上刊登的就是我们生成的两幅三维幻视图。

三维幻视图的一个突出特点是它在空间水平方向的准周期性:整幅图在 $x$ 方向分成多个周期,各个周期内的画面大体相似。下面解释为什么要这样。对这种体视图我们希望不用任何辅助装置,仅用肉眼就看出立体感。这就要求左、右眼像不要混杂在一起,否则还要采用偏振眼镜或有色眼镜之类的辅助装置来把二者分开。因此二者应在空间错开。但是又不能离得太开,因为这时要采用两眼分别注视空间两点的观看方式,而只有当这两点相距很近时,眼睛才容易转到这种观看方式。于是使左眼像和右眼像在空间不是完全错开,而只错开一段小距离 $t$ ,这时左眼像与右眼像仍有一大段重叠。如果二者重叠的部分完全相同,便没有左眼像与右眼像混杂的问题了。左眼像的右段怎么能和右眼像的左段完全相同呢?对于一般的景物这当然是不可能的,但是对于具有空间准周期性的景物却有可能。我们这样来画三维幻视图:取 $t$ 为一个周期的长度,三维幻视图的整个画面在 $x$ 方向分为 $n$ 个周期(一般取 $n = 4 \sim 10$ ),从左到右编号为1到 $n$ 。把三维景物的第一个周期的左眼像画在幻视图的周期1内,其共轭的右眼像构成周期2的画面。由于景物的准周期性,可取周期2的画面为左眼像的延续,即景物的第二周期的左眼像,对应的新的右眼像构成周期3,……,如此等等。周期 $i$ 是和周期 $i - 1$ 共轭的右眼像,又是和周期 $i + 1$ 共轭的左眼

像。左眼像和右眼像有差别(视差),但是差别不大,这就造成了三维幻视图画面的准周期性,它是和三维景物的准周期性相联系的。一切三维幻视图的画面都是准周期的,从三维幻视图看出的三维景物也是准周期的。

准周期的三维景物分两种情况:一种是某种物体的准周期排列,如—排汽车,—列飞机等;另一种如用花布缝成的一顶帽子,它本身虽然不是周期性的,但构成它的花布图案却是周期分布的,只是远近不同。与此相应,也有两种三维幻视图:一种(封4上)是一个简单图符(如汽车、飞机)以不同的间距在 $x$ 方向重复;另一种(封4下)是某种复杂纹理在 $x$ 方向的重复,重复的间距受到一个缓变的纵深距离信息的调制,好像一个高频载波受一个低频信号调制—样。看到的三维像的纵深距离由前式决定。

设三维幻视图有 $n$ 个周期。周期1至 $n - 1$ 为左眼像,周期2至 $n$ 为右眼像。观看时之搭配关系如下:

左眼像      1 2 3 ...  $n - 1$   $n$

右眼像      1 2 3 4 ...  $n$

因此整个视场中将看到有 $n + 1$ 个周期。最边上的两个周期是单眼看到的,没有立体感;只有中间双眼看到的那些周期有立体感。

由于三维幻视图画面的周期性重复,用计算机生成很容易。计算机生成的算法是(图5)

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x = x_i - \frac{ez}{d - z}$$

$$y_{i+1} = y_i$$

其中 $x_i, y_i$ 和 $x_{i+1}, y_{i+1}$ 分别为同一特征点在周期

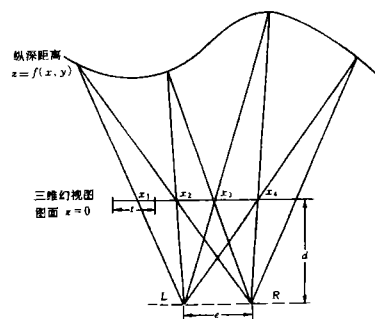


图5

# 环境的作用与量子力学的破坏

李世兴

李学潜

沈彭年

(山西省科学技术委员会)

(南开大学物理系)

(中国科学院高能物理所)

量子力学是描写尺度在普朗克常数量级的微观体系的理论,它被我们在广阔范围内的观察所肯定和证实. 我们有理由相信量子力学应是讨论微观体系性质的基础. 从量子力学扩展到量子场论,正如德布罗意多年前评述的,是强调了波粒二象性的另一方面——场的量子化. 原则上说,量子力学和量子场论有许多相通之处.

在我们传统的教科书上均将讨论的量子系统处理为一个孤立系统. 在一般情况下由于环境对系统影响不大,所有的反应(跃迁,散射等)均可视为绝热过程,这种孤立处理是很好的近似. 然而在一些特别的情况下例如高温高密的环境中或我们下面要介绍的,在环境中充满宇宙大爆炸后遗留下来的微黑洞背景下,环境会与系统作用. 这可以体现在对薛定谔方程形式的修正项上, J. Ellis 等人称之为量子力学的破坏. 所谓量子力学破坏是指量子系统初始时刻处于一个纯态(某个力学量完全集合的本征态),然后它可以随时间演变成一个混态.

在通常意义下,量子力学教科书都是仅涉及研究纯态:所谓纯态就是系统可以用几率振幅来描写,因而有干涉性或迭加原理. 而混态与纯态

不同,它不能用几率振幅来描述,而仅能用在某一个态中的几率来确定系统的状态,这时迭加原理或干涉性消失. 可用光的相干性来理解纯态与混态,其实最初关于纯态和混态的定义就是基于光的干涉性质的. 纯态对应两束光从同一个光源出发,它们有相干性,也就是我们可以确定一个光子在某一束光中的几率振幅,而混态表示两束光分别从两个不同光源出发,因而只能说光子在某束光中的几率,没有相干性质.

在量子力学的教科书上,用几率振幅来描写系统状态以及迭加原理是作为基本假定存在的,因而当存在由纯态向混态过渡时,我们可以看到通常意义下量子力学的破坏. 我们知道,薛定谔方程是将有厄米性的哈密顿量  $H$  作用在波函数上,也就是几率振幅上.

薛定谔方程可写为

$$i \frac{\partial}{\partial t} \varphi = H\varphi. \quad (1)$$

这个简单的方程形式是不可能给出量子力学的破坏的,换言之,如果计入环境对系统的某些特殊影响,若使得系统从纯态过渡到混态,我们必须修改薛定谔方程.

最简单的也有相当普遍意义的是两能级量

$i$  和  $i+1$  内的坐标,  $z$  为  $(x_i, y_i)$  和  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  这一对共轭点所对应的三维像点离图面的距离.

## 四、小 结

上面讨论了产生立体感视觉的原因,介绍了两种常见的体视图(红绿体视图和三维幻视图)的原理和计算机生成的算法. 我们看到,视线角的生理效应给出参照距离远近的感觉,而双目视差则给出了相对于参照平面的凹凸. 两种体视图的基本原理相同,不同的仅是观看时

左眼像和右眼像在空间是否叠置,以及随之而来的不同的观看方式. 我们也澄清了两种观看方式的区别;习惯的观看方式是双眼注视景物上一点,同时对此点所在的距离对焦,参照距离与对焦距离相同;而观看三维幻视图时则两眼分别注视图上不同的点,视线在图后某点相交,但双眼仍是对图面聚焦(而不是如某些文献所说对视线相交处的距离聚焦),参照距离不同于对焦距离.