PIBB 生物化学与生物物理进展
Progress in Biochemistry and Biophysics
2014, 41(6): 610~616
www.pibb.ac.cn

动态歧义图知觉中的瞳孔反射和眼动扫视行为 *

谭 恒[1, 2] 王 毅[1)**]

([1)] 中国科学院生物物理研究所，脑与认知科学国家重点实验室，北京 100101；[2)] 中国科学院大学，北京 100049)

摘要 歧义图的双稳态知觉是一种非常有趣的视觉现象，但对其机制还不十分清楚．采用“运动产生的结构”(structure-from-motion)的歧义图和无歧义的对照图，我们研究了这一问题．被试者在报告对歧义图和无歧义图的知觉发生翻转时，其瞳孔都扩张，而且在翻转之后都达到峰值；与无歧义图条件下不同，在报告知觉翻转前，歧义图条件下的瞳孔要明显小于均值，而在瞳孔扩张达到峰值之后，瞳孔仍然明显大于均值．这些结果说明知觉翻转后的瞳孔扩张是一个表达被试知觉状态已改变的指标．而对歧义图和无歧义图刺激的瞳孔反射的差异，可能反映了由歧义图所产生知觉翻转的神经信号和知觉状态的内源性．另外，被试眼动扫视的方向会随着运动轴的变化呈现不同的扫视分布模式，但在歧义图与无歧义图之间分布模式是一致的，这不仅表明被试从歧义图中感知到了与无歧义图同样的信息，也表明瞳孔反射变化与双稳态知觉变化相关的结论具有可靠性．本文对歧义图双稳态知觉的视觉机制提供了新的认识．

关键词 双稳态知觉，歧义图，运动产生的结构，眼动扫视，瞳孔反射
学科分类号 B842.2，Q189 **DOI**: 10.3724/SP.J.1206.2013.00159

歧义图是一种非常奇妙的视觉图像，它指的是一个图像可以产生两个不同，甚至截然不同，且有意义的知觉图形，知觉到的图像可以在两个稳态图形间转换(如：Necker cube，Rubin vase)．因此双稳态图像成为视知觉研究中非常有用的刺激模式．许多研究都试图揭开这种知觉现象的本质，即相关的神经机理[1]，其中很多研究都立足于寻找与双稳态知觉现象相关的功能脑区及回路．一些实验表明，不同的歧义图知觉有特异的脑区，甚至有特异的神经元电活动与之相关[2-4]．

尽管如此，对于不同的歧义图知觉仍然没有形成完整统一的理论来加以解释．这可能是由于涉及这种知觉的大脑高级活动较为复杂，所以不同的歧义图所激活的神经回路机制本身不同[5]．当然，还有一种原因可能是由于影响这种知觉过程的因素比想象中要多，其中可能还包括歧义图本身的视觉刺激形式[6]，从而使影响歧义图知觉稳定性的因素也比较多变．

在众多可以影响歧义图知觉过程的因素中，视觉系统的眼球运动控制回路可能起着重要的调节作用．对于这一观点，学术界至今还没有确切的结论．根据其他研究者的工作，眼睛注视位置的变化可以影响歧义图知觉的稳定性[7]．但也有实验结果支持知觉状态与眼动不存在明显的因果联系[8]．同时，眼动扫视和微扫视对歧义图知觉翻转的影响也截然不同[9-10]．这些实验结果的不一致性提示，眼动作为一个重要的因素，其对歧义图知觉过程的影响尚不完全明确，需要进一步研究眼动与歧义图知觉之间的关系．在另一方面，一项研究显示眼睛瞳孔的扩张同样也与主体对歧义图知觉的变化相关[11]．但是，该研究因没有使用无歧义图作为对照刺激，存在缺陷．

为了了解视觉运动与歧义图知觉之间的联系，从而进一步探究歧义图知觉过程的神经机理，我们

* 国家自然科学基金(30623004, 30870831)，国家高技术研究发展计划(863)(2007AA02Z313)和中国科学院知识创新工程(KSCX1-YW-R-32)资助项目．

** 通讯联系人．
Tel: 010-64888453, E-mail: yiwang@ibp.ac.cn

收稿日期：2013-04-16，接受日期：2013-05-27

采用心理物理学实验方法，通过眼动检测技术，对在动态歧义图刺激下的眼动行为和在歧义图的知觉翻转过程中的瞳孔反射行为，进行了有对照实验的研究，对歧义图知觉的视觉机制有了新的理解.

1 方法与材料

1.1 方法

实验图形刺激采用动态的“运动产生的结构”(structure-from-motion)连续呈现的歧义图刺激. 刺激是由两组相向运动的 150 个随机点构成，其运动速度按照余弦函数的规律变化，即在刺激中心的点运动速度最快，离中心越远，点的运动速度越慢. 在被试看来，会知觉到是一个在自转的球体(图 1a 左图). 从此歧义图可以知觉到该球体有顺时针旋转和逆时针旋转两种互斥的状态. 随机点的密度受到一定的控制，以避免某些局部区域出现随机点过于密集，从而形成明显特定图形模式的情况. 随机点的大小是 0.17°，球体的视野大小是 12°，放置于视野正中央. 随机点的运动速度相当于球体在以 45°/s 的速度自转. 被试眼球距离显示器 90 cm. 由于歧义图的知觉状态变化是很难主观控制的，所以为了在知觉上给被试以确定的感觉作为对知觉状态的控制，我们选择了由红蓝两色立体镜提供的双眼视差立体图形，具有特定深度信息的红蓝两组随机点在相向运动，随机点的深度信息随它所处的要表现出来的球体位置的不同而不同，以呈现具有固定顺时针和逆时针旋转方向的球体结构，作为无歧义的对照刺激(图 1a 右图). 除了深度信息外，无歧义与有歧义刺激之间，在其他参数和实验条件无差别.

实验采用 Samsung 公司型号为 SyncMaster T220 的 22 英寸宽屏液晶显示器作为刺激显示的设备. 刺激呈现程序均采用 MathWorks® 公司开发的 MATLAB® 软件为基础，配合使用 Psychtoolbox-3[12-13] 工具箱编写而成. 显示器的刷新频率为 75 Hz，经过主观检测，运动图像不出现明显“拖尾”现象. 眼动记录仪采用美国 ASL 公司的 Eye Tracker 6000 型红外线眼动记录仪. 摄像头的记录采样率为 120 Hz. 实验中统一监视和记录被试右眼的眼动和瞳孔大小变化的数据.

1.2 被试

一共有 11 个被试参加本实验，其中女性 2 人. 年龄在 24～30 岁. 校正视力均在 5.0 以上. 2 人是左利手. 4 人的主视眼是左眼. 整个实验需要佩戴红蓝立体镜. 所有被试的头部均用固定支架进行固定，以限制被试头动. 所有被试均签署了实验知情同意书并填写了基本信息情况调查表. 所有实验准则均参照《赫尔辛基宣言》.

1.3 任务设计

在正式实验开始之前，有两次训练测试，让被试熟悉整个实验流程及图形刺激的模式. 整个实验包括两种测试：a. 无歧义的图形刺激，就是有双眼视差的图形刺激，被试不会产生有歧义的知觉(图 1a 右图). 呈现 6 次，每次测试中无歧义运动方向的翻转变化发生 5 次，出现的时间随机而“均匀”地分布在整个刺激的呈现时间段，每个状态大约维持 8～16 s，平均时间是 12 s. 一旦运动方向发生变化，被试需要立即报告. 由于人为知觉变换的时间点如果是瞬时的，会容易给被试突兀的感觉，从而造成不必要的干扰. 为了消除这种影响，我们在调节转换双眼视差角度的过程中给予 1 s 的逐渐过渡期. b. 有歧义的图形刺激，就是没有双眼视差的图形刺激，刺激图形的形式始终保持不变，观察它的被试可能会产生有歧义的知觉变化(图 1a 左图).

以上两种刺激出现的次序完全随机，其中任意一个测试的持续时间为 1 min. 在刺激显示之前会有 3 s 的注视时间，在刺激出现前，显示器屏幕的中央会显示一个十字，大小为 0.52°，并要求被试注视这个十字(图 1b). 当知觉发生变化时，要求被试立即报告感觉到的知觉状态，即球体旋转的方向的改变. 每种刺激重复完成 6 次测试，自转轴分别为垂直和水平的情况各 3 次，一共完成 12 次测试. 每两次测试之间有可以由被试控制的休息时间. 无论对于哪一种测试，除了每个测试开始前呈现十字时要求被试注视外，其余时间均不限制被试的眼动，被试可以自由注视，但是必须注意刺激图形，并真实报告刺激图形运动方向的翻转. 当被试结束实验后，我们询问被试对实验的主观看法，包括任务的难易程度，以及在实验过程中被试的精神状态等. 在询问中，被试报告，不能分辨出有两类图形刺激的差别. 这说明刺激的参数设置达到了足够相似的程度. 并且，在被试观察无歧义视觉刺激时应该做出的 203 次反应中，有 187 次反应正确，正确率为 92.1%，说明被试报告的知觉状态真实可靠.

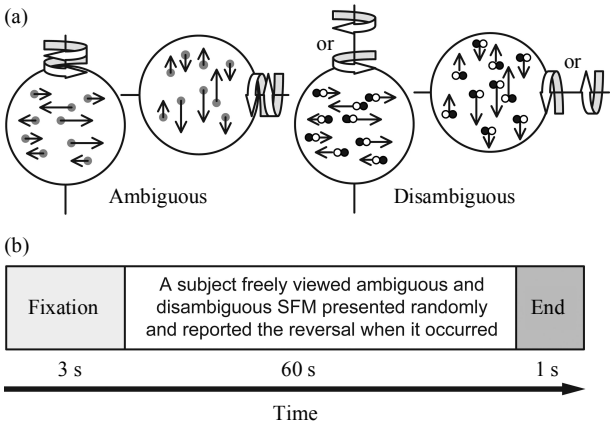

Fig. 1　Visual stimuli and task

(a) The ambiguous spherical figures (left) generated by the "structure-from-motion" (SfM) of two sets of random dots without a disparity difference (indicated by a gray dot), but with different speeds (indicated by the length of an arrow) moving along two opposite directions in the vertical or horizontal axes and the disambiguous spherical figures (right) generated by that of those dots with different disparities (indicated by white and black dots) and different speeds moving along two opposite directions in the vertical or horizontal axes. Note that there were four distinct figures or rotation directions generated by different disparities, two in the vertical motion axes and the other two in the horizontal axis (right of a), for disambiguous stimuli. (b) The time scale of the task. After a subject fixed his or her eyes at the cross for 3 s, a stimulus was presented for 1 min during which the subject could freely move his or her eyes, but he or she had to pay attention to the stimulus and press a key to report the event when he or she perceived the reversal occurred in the rotation direction of the spherical figure (stimulus) along the vertical or horizontal axes. The ambiguous figures and disambiguous figures were presented together in a pseudo-random sequence in one block.

2　实验结果

2.1　眼动扫视与视觉刺激的相关性

在检测并统计被试在观察围绕水平轴和垂直轴自转的两种动态视觉刺激状态下发生的眼动反应后，我们注意到被试的眼动扫视行为与视觉的刺激形式相关．在判断眼动扫视行为时，我们选择将扫视峰值速度大于 54°/s 的眼动行为定义为眼动扫视．所有 11 个被试中，共计有 2 013 个数据达到这一标准．然后，我们计算每一个眼运动轨迹相对于水平线的角度，并统计其分布，见图 2.

从图 2 可以看到，根据刺激的自转轴不同，眼动扫视的角度分布也不同．在 2 013 个眼动扫视数据中，对有歧义的刺激图，在刺激绕垂直自转轴运动时，眼动扫视在分布 330°～30°和 150°～210°范围内的为 365 次(图 2a)，在其他角度的为 157 次；在绕水平轴运动时，在 60°～120°和 240°～300°的为 254 次(图 2b)，在其他角度的为 293 次．对无歧义的刺激图，在绕垂直轴运动时，330°～30°和 150°～210°范围内的为 387 次(图 2c)，在其他角度的为 120 次；在绕水平轴运动时，在 60°～120°和 240°～300°的为 261 次(图 2d)，在其他角度的为 176 次．当刺激是围绕着垂直自转轴运动时，被试倾向于更多地进行水平方向上的眼动扫视(图 2a, c)；当刺激是围绕着水平自转轴运动时，被试倾向于更多地进行垂直向上的眼动扫视(图 2b, d)．由于眼球可以进行任意角度的眼动扫视，所以在理论上各方向上都随机出现的眼动扫视，会在各扫视角度上呈现均匀的分布．将图 2 中各种刺激条件下的眼动扫射行为数据与该条件下相同样本数据的均匀分布进行比较，统计分析显示，在有歧义动态视觉刺激下的眼动扫视分布，无论是在沿水平轴，还是垂直轴，都与均匀分布的扫视行为显著不同(垂直自转轴，$P < 0.005$，n=522；水平自转轴，$P < 0.02$，

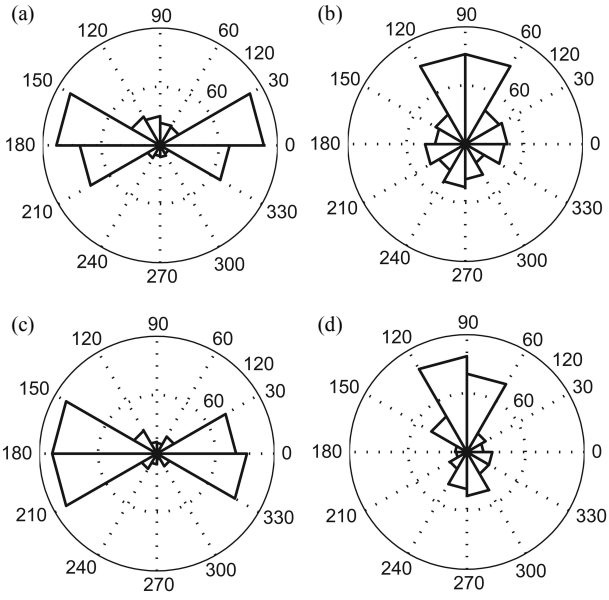

Fig. 2　Distribution of eye saccadic angles of subjects according to the rotation axis of random dots and stimulus type

Most saccadic angles (>54°/s) distributed along the 0°～180° axis (a, c) or 90°～270° axis (b, d) when random dots were perceived to rotate around the vertical axis (a, c) or horizontal axis (b, d) for the ambiguous stimulus (a, b) or for the disambiguous stimulus (c, d). The directions of eye saccades from 0° (the right) to 360° are indicated by the numerals outside each polar plot. The numbers of eye saccades within a range of 30° from directions of 0° to 360° are indicated by the numerals (60 and 120) along the radial axis.

n=547；Kolmogorov-Smirnov Test)．但是，把被试在有歧义刺激情况下(垂直自转轴，n=522；水平自转轴，n=547)与无歧义刺激情况下(垂直自转轴，n=507；水平自转轴，n=437)的眼动行为进行对比，只要是自转轴相同的测试，就没有呈现出显著的差异(垂直自转轴 P=0.1862；水平自转轴 P=0.7864；Kolmogorov-Smirnov Test)．

这一结果表明，被试的眼动扫视行为会随着有歧义刺激的不同而变化．这提示眼动扫视行为并不是完全无意识的随机行为，这种由运动产生的有歧义刺激的特异性，与无歧义图刺激一样，伴随着有明显趋势的眼动扫视行为．因为有歧义刺激下的眼动扫视与无歧义刺激下的眼动扫视无显著性差异，说明在有歧义刺激情况下，虽然刺激在整个呈现期间，其物理性质完全没有改变，但是其眼动扫视行为说明有歧义刺激也像无歧义刺激一样，使被试产生了球体在旋转的知觉．

2.2 知觉与瞳孔反射的相关性

无论是在被试观察有歧义还是无歧义的图形刺激，在被试报告知觉发生变化时，被试的某些生理指标会发生变化．有实验证据表明，被试的瞳孔扩张会伴随着被试的知觉变化，虽然这种变化并不确定是否是产生知觉翻转的诱因[11]．我们统计并比较了被试在观察有歧义和无歧义图形刺激，在知觉状态发生变化时的瞳孔反射行为．

由于每一个被试的瞳孔直径并不相同，我们将被试的瞳孔直径用 Z 分数方法进行归一化．就是将每一次测试的刺激呈现(60 s)时所采集到的瞳孔直径数据，一次成功的测试有 60 s × 120 Hz = 7200 个数据点，按照标准正态分布进行排列，每一个数值所对应的标准正态分布数值即为该瞳孔直径所对应的 Z 分数，该数值没有单位．计算公式如下：

$$\text{data}_{\text{z-score}}=\frac{D-\overline{D}_{\text{pupil}}}{\sigma_{\text{pupil}}}$$

数据点的 Z 分数 $\text{data}_{\text{z-score}}$ 是每一个数据点的值 D 与该次测试刺激呈现时间内的瞳孔直径的均值 $\overline{D}_{\text{pupil}}$ 的差值，再除以该次测试刺激呈现时间内的瞳孔直径的方差 σ_{pupil}．这样，无论瞳孔直径数据是否来自于同一个被试或者来自于同一个被试的不同次测试，它的 Z 分数分布都对应成均值为 0，方差为 1 的标准正态分布．

获得被试成功地报告知觉变化，并同时在该次测试中又获得该被试有效的瞳孔测量数据的测试次数，总计为 103 次，其中有歧义图刺激为 35 次，无歧义图刺激为 68 次．我们把被试行为报告的时间设为零点，并将每种条件下所有有效数据的瞳孔直径的 Z 分数以零点对齐，进行叠加(图 3)，然后将叠加后每一数据点的分布，与均值为 0 和方差为 1 的 Z 分数的标准正态分布进行比较．结果显示，在被试发生知觉翻转(图 3 x 轴的 0 点)前，对两种刺激，其瞳孔都有逐渐扩张的趋势，在报告发生知觉翻转后，被试的瞳孔开始显著地大于被试的均值(P < 0.01，t-test；图 3 中下方水平深灰色和浅灰色显著性指示条带)．这印证了知觉变化会伴随瞳孔扩张的结果[11]．对有歧义刺激，显著性的瞳孔扩张持续时间从 0.416～2.1 s (n=35)，对无歧义刺激，从 0.242～1.25 s (n=68)；达到峰值(有歧义图为 0.742 s；无歧义图为 0.783 s)后，瞳孔大小出现了差异，对无歧义刺激，恢复到均值附近，而对有歧义刺激，峰值后仍然显著地大于均值(P < 0.01)，

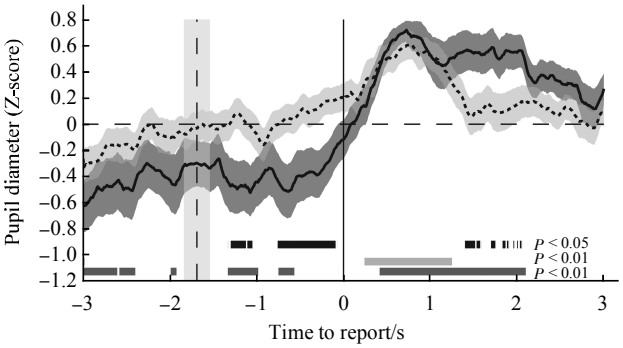

Fig. 3 Relationships between pupillary reflexes and perceptual reversals to ambiguous figure and disambiguous figure

Pupil size was expressed with Z-score in diameter (y-axis). All data were aligned to the time point (vertical solid line at 0 of x-axis) when a subject reported the perceptual reversal happened to the stimulus. The dotted curve and shadow light gray around it indicate the mean and s.e.m. (n=68) of pupil sizes to disambiguous (control) figures, respectively. The solid curve and dark gray shadow around it indicate the mean and s.e.m. (n=35) of pupil sizes to ambiguous figures. The dashed vertical line and light gray shadow around it indicate the mean and s.e.m. (n=68) of the times when the reversal of the disparities of disambiguous figure occurred. The dashed horizontal line denote to the means (0 of y-axis) of pupil sizes to both disambiguous figures and ambiguous figures. The horizontal dark gray bars indicate the periods during which pupil sizes were significant different from the mean size (0) in the test with ambiguous figures (P < 0.01, n=35, t-test). The horizontal light gray bars are for disambiguous figures (P < 0.01, n =68, t-test). The horizontal black bars indicate that the periods during which pupil sizes to ambiguous figures and disambiguous figures were significant different (P < 0.05, n_1=35, n_2=68, t-test).

维持扩张状态．从 1.4～2.05 s，二者的差异是显著的($P < 0.05$, n_1=35，n_2=65，t-test；图 3 中 0 之后的水平黑色条带所示)．由于被试对无歧义刺激的知觉翻转是由其两组运动点的深度信息的翻转产生的，我们计算了刺激翻转到被试报告知觉翻转的正确反应时(reaction time，RT)，平均为(1.69 ± 0.15) s (s.e.m，n=68)．如果以被试按键报告的时间为 0 作为参照，这就是说无歧义刺激的深度信息的翻转发生在知觉报告前(–1.69 ± 0.15) s，如图 3 中垂直灰色柱和垂直虚线所示．在这之后约 0.36 s 开始，对两种刺激的瞳孔反应(大小)的差异增大．在有歧义刺激下，瞳孔大小相对于其均值有显著性的收缩($P < 0.01$)，表现为波谷；而无歧义的对照刺激则在其均值　附近，形成明显的对比．从–1.3～–1.05 s 和从–0.758～–0.092 s 二者的差异达到显著($P < 0.05$，n_1=35，n_2=65，t-test；图 3 中 0 前的水平黑色条带所示)．在有歧义的刺激条件下，被试的瞳孔在–1.69 s 之前，也明显低于均值($P < 0.01$，n=35，t-test)．此外，在被试观察无歧义刺激时，在发生知觉变化之前，瞳孔(垂直虚线之前的点线数据)也小于均值，但不显著($P > 0.01$，n=68)．这些都说明，在被试报告知觉发生翻转以前很长的时间，瞳孔就开始收缩，为知觉转换时的瞳孔扩张做准备．

在被试报告知觉发生变化后，被试在观察有歧义和无歧义刺激的瞳孔扩张到峰值，是非常相似的，说明在观察两种不同的刺激时，被试在知觉发生变化后的生理反应是相似的，所涉及的神经通路，如果不考虑有歧义刺激没有涉及到的感知自下而上(bottom-up)的双眼视差信息的通路，在一定程度上也应该相似．参考被试在观察无歧义图形刺激时正确反应的反应时 RT(1.69 s)，即–1.69 s 时，刺激发生了翻转，我们可以注意到，在被试观察有歧义图形刺激时，在报告知觉翻转前的瞳孔明显处于收缩的两个时间段中，第一个(–1.925 s 以前)远远地早于这个时间(–1.69 s)，而第二个(–1.333 s 以后)则在这个时间之后．这暗示了，第二个时间段的瞳孔收缩很可能与产生对有歧义图知觉变化的原因更相关．因为无歧义刺激产生的知觉翻转是由其随机点的深度信息变化，即外源性因素的变化诱发的，并且在知觉翻转前，被试的瞳孔一直在逐渐扩张，而对物理性质不变的有歧义刺激观察到了瞳孔的收缩反射，这暗示瞳孔的收缩反射可能反映出对歧义图知觉变化的内源性因素．

3 讨　论

我们采用心理物理学实验探索了歧义图知觉翻转与眼动扫视和瞳孔反射之间的关系．从实验结果中可以看到，动态歧义图的运动方向可以影响到眼动扫视行为的分布．另外，从图 2 中可以看到，在垂直眼动扫视行为中，偏向于向上的时间多，即向前滚动．这可能与我们是向前走(运动)，而不是向后退，或者说，在面对物体时，我们更多的是朝着接近物体而不是远离物体运动这一生态行为习性相关．

对瞳孔反射与双稳态知觉的相关性分析表明，瞳孔扩张确实与对歧义图知觉的变化相关．同时也说明有歧义知觉和无歧义知觉的信息处理存在相似性，瞳孔扩张可以成为被试在观察歧义图时，表征知觉已发生变化的一个指标．这与以前的一项研究结果[11]一致．但是瞳孔对两种刺激的反射也存在着不同之处，主要体现在临近被试报告知觉发生翻转之前和翻转后瞳孔扩张达到峰值之后．我们通过计算被试在观察无歧义图形时做出准确反应的反应时(RT)，推测对有歧义的刺激图形，临近知觉翻转时的瞳孔收缩行为可能与被试知觉状态的变化相关，可能反映了产生知觉翻转变化的内源性神经信号，而瞳孔扩张至峰值后的持续扩张也许与知觉变化后的稳定有关，或只是对歧义图知觉翻转后的伴随行为．在以往的研究中[11]，只观察到被试报告知觉翻转伴随着瞳孔扩张，只能探讨瞳孔扩张与知觉变化之间可能存在的关系．这是因为前一研究没有使用合适的对照刺激，从而无法在知觉发生变化时对与其相关的瞳孔变化的时间过程进行估算，所以无法判断瞳孔反射与知觉状态的动态时间联系，也就无法推断瞳孔反射与知觉状态变化的因果关系．而在我们的研究中，使用了含有视差深度信息的无歧义图作为对照刺激，不但观察到了知觉发生变化后瞳孔的扩张行为，还观察到了在有歧义与无歧义图形刺激下，瞳孔反射行为的差异．在被试报告发生知觉变化之前，无歧义图并没有诱发明显的瞳孔收缩，有歧义图在报告知觉翻转前的–1.333 s 诱发了瞳孔的显著收缩．对照无歧义刺激图的物理翻转发生在被试知觉翻转前–1.69 s，我们推测在歧义刺激图条件下在–1.333 s 发生的瞳孔收缩更有可能反应了被试的知觉状态或产生知觉变化的内源性神经信号．

有歧义图形刺激下的眼动扫视与无歧义图形刺

激下的眼动扫视无显著性差异的结果，说明被试从歧义图与无歧义感知到的信息是一样的，同时，也说明用此无歧义图来做对照实验是完全可靠的．被试在这两种刺激条件下，其瞳孔都在报告知觉翻转后发生显著扩张，也支持这一结论．这些都表明我们观察到的在被试报告知觉翻转之前，瞳孔发生收缩，这一结果也有可靠性．

由已有的神经生理学和神经解剖学知识，我们知道眼动扫视与上丘以及额叶的快速眼动区密切相关．副交感神经从腹侧上丘的埃 - 魏核出发，经过动眼神经与虹膜括约肌相连，通过激活括约肌上的乙酰胆碱 M3 受体，控制瞳孔收缩．交感神经则从下丘出发，经过动眼神经与虹膜舒张肌相连，通过激活甲肾上腺素 α1 受体，控制瞳孔扩张．同样位于下丘附近的蓝斑核是分泌去甲肾上腺素的重要核团．埃 - 魏核、上丘、下丘的解剖学位置非常接近，而这些核团的神经投射，广泛地联系着大脑的许多重要脑区，如扣带回、杏仁核等．结合我们的研究结果，一个可能的解释是，作为与人眼部成像密切相关的眼球运动控制肌肉、瞳孔括约肌和舒张肌，受到上丘和下丘核团的控制．交感神经和副交感神经在调节瞳孔反射的过程中，影响到了眼球的视觉成像，从而改变了大脑对于歧义图刺激的感知．歧义图刺激的某些特征可以影响到眼部的运动行为，同时在知觉发生翻转前后，瞳孔的反射扩张可以既指示被试的知觉状态变化，同时又影响被试的知觉变化．

在日常生活中，人们并不能感知到自己瞳孔的变化．但是，心理学实验已证明瞳孔反射的大小变化确实反映出人们在知觉状态上的变化[14]．我们相信，进一步设计更多其他歧义图和无歧义的对照图来研究眼动扫视和瞳孔反射与双稳态知觉的关系，很可能对阐明双稳态图像知觉的视觉机制及其神经过程提供重要的洞悟．

参 考 文 献

[1] Leopold D A, Logothetis N K. Multistable phenomena: changing views in perception. Trends Cogn Sci, 1999, **3**(7): 254−264

[2] Bradley D C, Chang G C, Andersen R A. Encoding of three-dimensional structure-from-motion by primate area MT neurons. Nature, 1998, **392**(6677): 714−717

[3] Lumer E D, Friston K J, Rees G. Neural correlates of perceptual rivalry in the human brain. Science, 1998, **280**(5371): 1930−1934

[4] Sterzer P, Kleinschmidt A. A neural basis for inference in perceptual ambiguity. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, **104**(1): 323−328

[5] Pearson J, Brascamp J. Sensory memory for ambiguous vision. Trends Cogn Sci, 2008, **12**(9):334−341.

[6] Leopold D A, Wilke M, Maier A, *et al*. Stable perception of visually ambiguous patterns. Nat Neurosci, 2002, **5**(6): 605−609

[7] Einhäuser W, Martin K A, König P. Are switches in perception of the Necker cube related to eye position?. Eur J Neurosci, 2004, **20**(10): 2811−2818

[8] Wimmer M C, Doherty M J. Investigating children's eye-movements: Cause or effect of reversing ambiguous figures?[C]// MCNAMARA D S, TRAFTON J G. Proceedings of the 29th Annual Cognitive Science Society. 2007, Austin, Texas: 1659−1664

[9] Van Dam L C, Van Ee R. The role of saccades in exerting voluntary control in perceptual and binocular rivalry. Vision Res, 2006, **46**(6−7): 787−799

[10] Van Dam L C, Van Ee R. The role of (micro)saccades and blinks in perceptual bi-stability from slant rivalry. Vision Res, 2005, **45**(18): 2417−2435

[11] Einhäuser W, Stout J, Koch C, *et al*. Pupil dilation reflects perceptual selection and predicts subsequent stability in perceptual rivalry. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, **105**(5): 1704−1709

[12] Brainard D H. The psychophysics toolbox. Spatial Vision, 1997, **10**(4): 433−436

[13] Pelli D G. The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. Spat Vis, 1997, **10**(4): 437−442

[14] Laeng B, Endestad T. Bright illusions reduce the eye's pupil. Proc Natl Acad Sci USA, 2012, **109**(6): 2162−2167

Pupillary Reflex and Saccade in Bistable Perception to Ambiguous Figure of Stucture-from-Motion*

TAN Heng[1,2], WANG Yi[1)**]

([1)] *State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, China;
[2)] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

Abstract Bistable perception to ambiguous figure is an intriguing visual phenomenon. The underlying mechanisms, however, remain largely unclear. We addressed the issue by recording eye saccade and pupillary reflex in the perceptual responses of human subjects to the ambiguous figure and disambiguous figure (control) generated from the structure-from-motion stimuli. Their pupils dilated when the subjects reported the perceptual reversal between the two mutually exclusive states to both the ambiguous figure and disambiguous figure. The pupillary dilation reached the peak after the perceptual reversal. In contrast to the disambiguous figure, before reported the reversal to the ambiguous figure, the pupils were smaller than the mean size, while after the peak of pupillary dilation occurred, the pupils were still larger than the mean size. These results illustrate that the pupillary dilation posterior to the perceptual report can be regarded as an indication of the perceptual reversal that had occurred, while the differences in pupillary reflex to the ambiguous figure and disambiguous figure prior to the perceptual report probably reflects the intrinsic neural trace of the perceptual reversal and of the perceptual states. Additionally, in the process of perceiving structure-from-motion stimuli, the distribution in directions of eye saccades of subjects changed with the change in the motion axis of the stimuli. The change fashions were accordant between the ambiguous figure and disambiguous figure. This suggests that subjects have the same perception to the ambiguous figure and disambiuous figure and that the correlation of the pupillary reflex changes with the perceptual reversals to the bistable figure of structure-from-motion is reliable. The study casts new light on the visual mechanisms for bistable perception to ambiguous figure.

Key words bistable perception, ambiguous figure, structure-from-motion, saccade, pupil reflex
DOI: 10.3724/SP.J.1206.2013.00159

*This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (30623004, 30870831), The National High Technology Research and Development Program of China (2007AA02Z313), and the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (KSCX1-YW-R-32).

**Corresponding author.
Tel: 86-10-64888453, E-mail: yiwang@ibp.ac.cn

Received: April 16, 2013 Accepted: May 27, 2013