



果蝇的视觉模式识别 具有视网膜位置不变性*

唐世明

(生物物理研究所 北京 100101)

摘要 2004年8月13日出版的 *Science* 发表了由生物物理研究所主持、与德国沃尔兹堡大学合作完成的“果蝇视觉模式识别具有视网膜位置不变性”的研究成果。本文介绍了该项成果的研究背景、意义、主要创新点及方法。

关键词 果蝇, 视觉模式识别, 不变性

视觉不变性是高等动物视觉系统的基本特征之一, 我们的大脑可以识别出特定的视觉目标, 并且容许视觉图案呈现在视野的不同位置、容许图案按比例缩放或旋转一定角度。图案位置、尺寸、角度的改变会导致视网膜甚至是初级视皮层神经活动的极大变化, 大脑通过何种神经机制从变化的视觉输入得到稳定的识别输出, 是一个复杂的研究课题, 目前人们还不能从本质上理解视觉不变性是如何产生的, 这成为理解脑及实现人工智能的最主要障碍之一。

在视觉认知中, 信息按特征进行分解分析, 如颜色、大小、位置、形状、方向等等, 巧妙之处在于, 自然进化的结果使得这些特征的分解是正交的, 换句话说, 一种特征的变化不会影响另一种特征的识别。特征分解的正交性和稳定性对应了视觉认知形成概念分类, 即我们可以用稳定的概念描述变化物像, 能做到以不变应万变, 这正是高等动物视觉系统设计的高明之处和智能所在, 也是视觉不变性的进化意义。视觉不变性的神经机制研究将揭示概念如何形成、如何存储, 有了概念才有思维和内心世界的构建, 因而视觉不变性研究将是理解脑之智慧的关键和切入点。

视觉不变性这种重要的生物特性在低等动物中一直没有被发现。以往人们认为果蝇的脑很简单, 只能按模板匹配识别图形, 如果遇到同样目标, 位置稍微变一点就会认不出来了。研究果蝇这类自由运动的生物是否具有视觉不变性有一定的困难。利用飞行模拟器可以训练果蝇识别图形, 在飞行模拟器内果蝇的身体包括眼睛都被固定, 而所看的视觉目标可以移动, 这使我们可以研究其视觉平移不变性。

在飞行模拟器中, 果蝇被固定在一个力矩测量装置上, 果蝇虽然不能飞走, 但其翅膀舞动产生的力可以控制一个贴有视觉图案的圆筒绕其转动, 就象果蝇在不同图案间飞来飞去一样, 使用这一系统可以训练果蝇认识图形^[1,2]。视觉圆筒是水平旋转的, 因此可以在垂直方向上移动图案以研究纵向的平移不变性, 即用某一高度的图案训练果蝇, 而后在另一个高度用相同的图案检测。如, 果蝇能在新的位置认出原来的图形, 则表明其视觉有平移不变性。由于果蝇的脑简单, 以往的研究认为果蝇没有视觉不变性, 可能仅使用简单的模板匹配机制, 在看东西时对目标拍照, 下次再遇到这个目标时, 如果位置变了一点就认不出来了^[3-5]。对蚂蚁视觉的研究也有类似结论, 蚂蚁用左眼不能认出右眼看过的东西^[6]。

* 收稿日期: 2004年10月20日



以往对于果蝇的视觉研究表明,果蝇可以利用图形尺寸、重心位置、颜色等参数识别图案^[7-9]。以前研究果蝇不变性视觉,使用的图案具有重心位置线索,训练果蝇区别纵向位置差别之后,再进行纵向平移,将干扰视觉不变性研究^[3]。在我们的研究中,使用不带重心位置线索的图案,如训练果蝇区分长的和短的线条,或蓝色与绿色的方块,训练后的果蝇可以学会喜欢某一个图案,将图案纵向移动使之相对果蝇在一个新的位置上出现。实验表明,果蝇仍能认出这一图案而不会将其视为陌生的图案。果蝇也可以区分 $\pm 45^\circ$ 倾斜的线条这样的图案,而且同样具有视觉平移不变性。

果蝇还可以被训练来识别更为复杂的组合图案,它们可以区分蓝色方块在绿色方块之上或蓝色方块在绿色方块之下,或者说果蝇不仅要学会识别颜色,而且要注意不同颜色的空间位置关系,学会区分这种组合图案的果蝇,在整个图案平移后仍能正确识别。类似的组合图案还有“<”与“>”,果蝇可以识别这些图案,并且有平移不变性。识别这种组合图案,需要同时知道图形元素的位置和特征,即可能存在整合“**What**”和“**Where**”的通道,利用这种机制,可以衍生出复杂而丰富的图形识别能力。

此外,为检测果蝇视觉在水平方向上的平移不变性,设计了新的实验模式。这一实验中,两个不同的图案被固定在果蝇的左面和右面,当果蝇试图转向某个图案时,身体会受到热惩罚,经过一段时间训练,果蝇就知道其中某个图是危险的,而较多地转向另一个安全的图案。这一实验模式使我们可以研究水平方向的视觉平移不变性,训练果蝇后,将图案在水平方向移动,甚至左右交换,果蝇仍能区分出危险或安全的图案,这表明其视觉在水平方向上有平移不变性,而且其视觉信息可以在两个脑半球间交流和共享,因此果蝇可以用左眼认出右眼看过的东西。

我们的实验还发现了一些有趣的视觉信息处理机制,如:视觉运动并不是模式识别的先决条件。眼睛在空间上固定的果蝇可以识别固定的视觉物体,该感知过程并不需要运动。尽管果蝇仍然能在

一定程度内移动其光感受器的光学轴,但这个移动的程度太小,并不能产生直接的运动。在目前的实验中,不管在训练还是回忆阶段图案保持固定,果蝇都能够在飞行模拟器中识别视觉图案,果蝇的旋转倾向表明他识别了这些图案。

利用力矩训练果蝇的实验中,在果蝇试图转向一侧图案期间,果蝇选择性地跟随该图案提示的方向运动,而忽略另一侧图案,可以推论,果蝇受到热击时,把热跟它想转向的那幅图联系起来,而在冷条件下,它把无热条件和它想转向的那幅图联系起来。因为果蝇被暴露在相同视网膜位置下的两幅图案中,它一定可以激活一个门控过程来选择性地加工相应于一个(或另一个)视野的视叶中部分视觉阵列。对行走着的果蝇的研究也提供了类似的现象,把视觉加工限制在选择视野区的能力称为选择性视觉注意。同样在飞行模拟器的实验中,可能也涉及选择性注意。对于飞行模拟器中的平移不变性检测,果蝇不仅需要储存图案的特征来识别,还需要方位角的值来识别方位。我们可以假设,在受热时,果蝇把刚好在注意窗口的那幅图跟热联系起来。在飞行模拟器中,果蝇在大多数时间把注意窗口保持在前沿位置。这样,该图案就会被标记“接近就危险”。

为实现新的实验设计,我们还从方法学技术上进行了原始创新,为该项研究设计制造了新型飞行模拟器,为该项研究打下方法学基础。同时这些具有自主知识产权的发明,也使得我们的系列研究工作可以在国内开展。

果蝇视觉具有平移动不变性,或者说果蝇也是按图形的概念进行识别,而非以前人们认为的按样板进行比对。这表明果蝇脑具有复杂的视觉信息处理机制,使昆虫视觉与脊椎动物视觉在认知层面上统一起来,对于视觉神经机制研究及进化论哲学认识都有重要的启示。

主要参考文献

- 1 Heisenberg M, Wolf R, Comp J. *Physiol. A Sens. Neural Behav. Physiol*, 1979, 130: 113.



- 2 Wolf R, Heisenberg M, Comp J. Physiol. A Sens. Neural Behav. Physiol, 1991, 169: 699 .
- 3 Dill M, Wolf R, Heisenberg M. Nature, 1993, 365: 751 .
- 4 Dill M, Heisenberg M. Philos. Trans. R. Soc. London B Biol. Sci. ,1995, 349: 143 .
- 5 Dill M, Wolf R, Heisenberg M. Learn. Mem., 1995, 2: 152 .
- 6 R. Wehner, M. Müller, Nature, 1985, 315: 228 .
- 7 Ernst R, Heisenberg M. Vision Res, 1999, 39: 3920 .
- 8 Tang S M, Guo A K. Science, 2001, 294: 1543 .
- 9 Heisenberg M. Curr. Opin. Neurobiol, 1995, 5: 475 .

致谢 该项研究得到生物物理研究所创新基金支持。

Visual Pattern Recognition in *Drosophila* Is Invariant for Retinal Position

Tang Shiming

(Institute of Biophysics, CAS, 100101 Beijing)

Vision relies on constancy mechanisms. Yet, these are little understood, because they are difficult to investigate in freely moving organisms. One such mechanism, translation invariance, enables organisms to recognize visual patterns independent of the region of their visual field where they had originally seen them. Tethered flies (*Drosophila melanogaster*) in a flight simulator can recognize visual patterns. Because their eyes are fixed in space and patterns can be displayed in defined parts of their visual field, they can be tested for translation invariance. Here, we show that flies recognize patterns at retinal positions where the patterns had not been presented before.

Keywords visual pattern, recognition in *drosophila*, invariant

唐世明 男,生物物理研究所研究员。1970年12月出生。1990年毕业于北京航空航天大学宇航工程系,1994免试攻读硕士学位,1996年免试攻读博士学位。1998年到生物物理研究所工作。在工程技术方面,解决“三级倒立摆控制”难题,使三级倒立摆率先在中国的实验室里竖立起来,在控制界产生了一定影响,获部级科技进步奖一等奖。带队赴日本参加“NHK创意对抗”国际机器人大赛,获“最佳创意”大奖。获首届“中国大学生跨世纪发展奖学金”特等奖第一名(全国十名)。研制成功多指节灵巧手,在北航、多伦多大学、香港中文大学等地应用,获部级科技进步奖二等奖。首次发现可以将N维自由度机器人优化控制,转化为R(冗余度)维自运动控制,突破性解决冗余度机器人的控制难题。在神经科学研究方面,2001年研究论文“Choice Behavior of *Drosophila* Facing Contradictory Visual Cues”发表在 *Science* 上。该研究工作完全在中国本土上完成,被权威专家饶毅评价为中国神经科学界近几十年来实验设计最为巧妙的研究工作之一。该项工作被国际同行多次引用,受到德国 Heisenberg 教授等学者的高度评价。首次发现果蝇具有视觉不变性,该项研究发表在 *Science* 上,使昆虫视觉与脊椎动物在认知层面上统一起来,对于视觉神经机制研究有着重要启示。目前研究将高密度电极阵列发展成为与 FMRI、光学成像同等重要的脑功能成像方法,用于解决时间编码、功能柱内编码、不变性神经机制等认知神经科学中悬而未决的科学难题。