

## 二阶运动条件下闪现滞后现象的研究

吕春利, 刘祖祥

(中国科学院研究生院、生物物理研究所认知科学重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 闪现滞后现象 (flash-lag effect) 是指运动物体旁闪现的物体在知觉中物体落后于运动物体的现象。对这个现象, 有一种解释认为视网膜上对运动刺激的外推机制对闪现滞后现象有相当的贡献。用视网膜外推机制不再有效的二阶运动刺激取代前人实验中的一阶运动刺激来研究闪现滞后现象, 发现在视网膜推断机制失效的情况下, 闪现滞后现象并没有减小, 而是和一阶运动刺激条件下的量相当。结果表明, 视网膜上的加工机制并不是闪现滞后现象的主要原因, 并提示闪现滞后现象的机制可能位于一、二阶运动加工通道的汇合阶段以上。

**关键词:** 闪现滞后现象; 视网膜; 运动外推机制; 一阶运动; 二阶运动

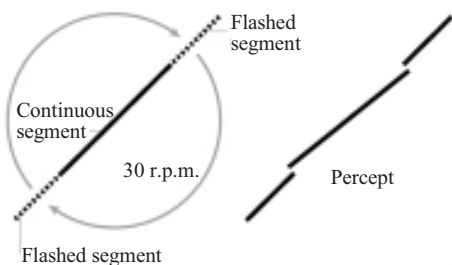
**中图分类号:** B842

### 1 引言

我们生活在一个变化的世界中, 需要不断地对外界的各种视觉刺激做出反应, 判断其空间位置、运动和其它与我们相关的各种特征。但是视网膜上的一个刺激要经过约 100 ms 才会被知觉到<sup>[1]</sup>。对于运动的物体, 在这段时间里可能已经运动了相当的距离。那么我们知觉到的运动物体的位置会因此而落后于真实的物理位置吗? 近年来, 在闪现滞后现象的研究中, 对这个问题进行了讨论。

1994 年 Nijhawan<sup>[2]</sup>在 Nature 上报道, 运动物体旁闪现的物体, 在知觉中体落后于运动物体 (图 1), 并称之为闪现滞后现象 (flash-lag

effect)。对这个现象, 研究者们给出了若干解释<sup>[3]</sup>。其中一种解释认为视觉系统在产生运动物体的位置知觉过程中有外推机制, 使知觉中的运动物体的位置更接近于它经过知觉潜伏期后的情形, 而不是延迟地对应于此前视网膜接受刺激时运动物体所在的位置。然而闪现物体是突然出现的, 外推机制不能起作用, 这样知觉中闪现物体就落后于运动物体<sup>[2]</sup>。但是, 关于这种外推机制发生在视觉通路的什么地方 (where), 却没有统一的观点。最近, Berry 等<sup>[4]</sup>在火蜥蜴 (salamander) 和家兔 (rabbit) 的离体视网膜上观察到, 视网膜对滑动的光棒刺激有外推现象, 即给某神经节细胞的感受野一个闪现光棒刺激, 该细胞经过约 50 ms 才兴奋, 而对于一个在视网膜上滑动的光棒刺激, 光棒还没有滑动到该细胞的感受野, 该细胞就会兴奋。Berry 等同时也指出, 这个现象可以用视网膜对运动光刺激的加工过程来解释, 该加工过程可用神经节细胞对光反应的线性滤波器模型描述, 所谓线性滤波器可以认为是落在感受野内的刺激所激发的神经兴奋和抑制在空间和时间上的线性累加之和。Berry 等认为, 这个现象的产生机制 (以后简称这个机制为视网膜的运动外推机制) 对



**Fig.1** Nijhawan's flash-lag set-up. The middle segment is continuously rotating clockwise at 30 r.p.m. ( $180^\circ /s$ ), whereas the flanked segments are flashed. The segments are perceived to be unaligned (as shown on the right). Adapted from Nijhawan<sup>[2]</sup>

收稿日期: 2003-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (697900800), 科技部项目 (1998030503)

通讯作者: 刘祖祥, E-mail: zxliu@cogsci.ibp.ac.cn

闪现滞后现象有很大的贡献<sup>[4]</sup>。

然而,在目前闪现滞后现象的研究中, Berry 等和其他研究者采用的运动刺激都是一阶运动刺激,即基于亮度定义的物体(运动物体的亮度和背景不同)在位置上的变化<sup>[4]</sup>。与一阶运动刺激不同,还有另外一类运动刺激,运动物体是基于图像的对比度、质地、闪烁等非亮度的二阶(或更高阶)属性定义的,这样的物体在位置上发生变化也会形成鲜明的运动感觉,这类刺激称为二阶运动刺激<sup>[5,6]</sup>。二阶运动刺激给视网膜上每个神经节细胞感受野的兴奋区域和抑制区域等量的光刺激,因此刺激激发的神经兴奋和抑制在空间和时间上的线性累加和不能表征运动物体。这也是由二阶运动刺激的本质属性决定的,即其加工机制在计算上不能只用线性滤波器模拟,而必须要另外附加一个非线性过程才能完成<sup>[6,7]</sup>。这样, Berry 等提到的基于神经节细胞对光的线性滤波器反应模型的视网膜外推机制将不再适于二阶运动刺激,一般认为要到大脑皮层区才能表征这类由非亮度的、图像的高阶属性定义的物体<sup>[8,9]</sup>。那么在视网膜运动推断机制不再有效的二阶运动刺激条件下,闪现滞后现象是否存在或减弱呢? 本文将对二阶运动刺激条件下的闪现滞后现象进行研究,同时进一步检验视网膜的运动推断机制对闪现滞后现象的贡献。

## 2 材料和方法

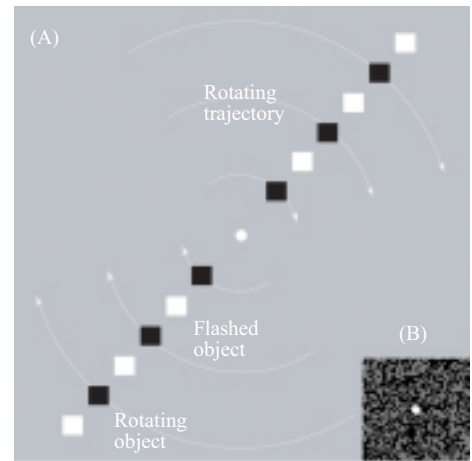
### 2.1 被试

大学本科生和研究生共 13 人,年龄 19 至 27 岁,其中男 6 人、女 7 人,视力或校正视力正常。其中一名被试的数据拟合程度值较低,处于 13 个人拟合程度构成的分布的 3 倍均方差以外,因此予以排除,但若不排除,也未影响统计显著性的结果。

### 2.2 刺激

刺激模式中运动物体和闪现物体的构成与前人研究<sup>[10]</sup>类似,运动物体和闪现物体都是由 6 个小方块沿直线排列构成,组成运动物体的小方块和组成闪现物体的小方块是交错排列的(图 2)。背景由静态的随机分布亮点构成,小方块是由其区域内的点与背景点的差异定义的(具体的差异见下面)。为了对照可能的影响因素,我们测量

了三种运动刺激条件下的闪现滞后量(构成运动物体的 6 个小方块的运动刺激类型决定整个运动物体的运动刺激类型)。(1) 通常的亮度定义的一阶运动刺激,即组成运动物体的小方块内的点的亮度高于背景点的亮度,这样运动物体的平均亮度 ( $26.0 \text{ cd/m}^2$ ) 高于背景 ( $2.40 \text{ cd/m}^2$ ) (以下简称亮度定义的运动刺激)。(2) 二阶运动刺激,组成运动物体的小方块内的点的亮度、密度以及对比度和背景点的完全相同,但小方块内的点为动态的随机点,既动态雪花点(以下简称二阶运动刺激,此刺激参考自文献[6])。(3) 为了和同等亮度的二阶运动刺激做比较,我们还设计了运动物体和背景是等亮度的一阶运动刺激,组成运动物



**Fig.2** Stimuli in the present experiment. (A) Schematic diagram of the random-dot stimuli. There is a fixation dot of  $0.24 \times 0.24^\circ$  at the center of the screen. Upon the static random-noise background (gray area), two groups of rectangle random-dot patches (objects) are presented trial-by-trial. One group of six objects (black rectangles) is rotating ( $100^\circ/\text{s}$ , clockwise or counterclockwise) around the fixation point. The other group of six objects (white rectangles) is flashed briefly (12 ms) on the screen. The rotating objects are defined respectively by luminance (luminance-defined motion), where the rotating objects have higher luminance than the background, or by different spatiotemporal properties between the object region and the random-noise background (second-order motion), where the dots in the rotating objects are scrambling randomly, or by motion-contrast (motion-contrast-defined motion), where the dots are motionless relative to the rotating objects, under different experimental conditions. (B) An example of the random-dot stimuli used in the present study. The white dot at the center of the figure is the fixation dot

体的小方块内的点的亮度、密度以及对比度和背景点的完全相同,但小方块内的点是整体共同运动的,而且小方块本身也是靠这些点的共同运动定义的。(文献[11]中称这种运动物体为“运动对比度”定义的物体,以下简称运动对比度定义的运动刺激,这类刺激的运动物体虽然和背景等亮度,但不是纯二阶运动刺激,因为它不具有纯二阶刺激的本质属性<sup>[6]</sup>)。运动物体的转动速度均为 $100^\circ/\text{s}$ 。整个实验所用的闪现物体都是一样的,平均亮度( $26.0 \text{ cd}/\text{m}^2$ )高于背景。上述刺激呈现在21英寸显示器上(长32 cm,宽24 cm,刷新频率85 Hz,分辨率 $1024 \times 768$ ),刺激程序使用matlab6.1+psychtoolbox编写,在Windows 2000下运行,实验在比较安静的暗室内进行。刺激整体视角大小为 $12.5 \times 12.5^\circ$ ,组成运动物体和闪现物体的每个小方块的视角大小为 $0.5 \times 0.5^\circ$ ,图像上的每个亮点和暗点的视角大小是 $0.06 \times 0.06^\circ$ 。从注视点至其一侧三个运动物体小方块中心的相应视角分别是 $0.75^\circ$ 、 $2.25^\circ$ 与 $3.75^\circ$ ,至闪现物体小方块的相应视角分别是 $1.5^\circ$ 、 $3.0^\circ$ 与 $4.5^\circ$ 。

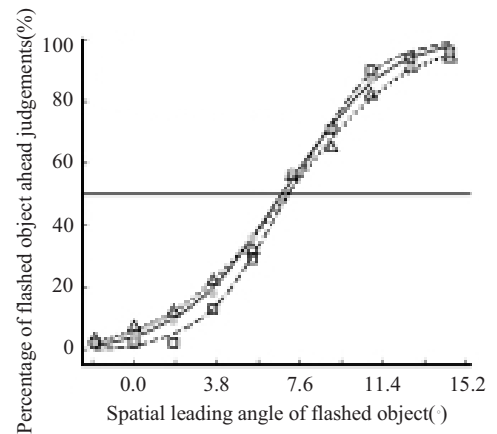
### 2.3 实验过程

被试盯住注视点,距屏幕约57 cm。转动物体初始位置总是水平的,顺时针与逆时针转动的试次(trial)在数量上相等,并随机排列,转动速度为 $100^\circ/\text{s}$ (圆周角),当转动到 $100^\circ \sim 130^\circ$ 中的某一角度时,闪现物体出现,呈现约12 ms后消失。我们用感觉阈值测量方法中的恒定刺激法<sup>[12]</sup>测量闪现滞后的量,即被试必须选择两种判断之一:闪现物体闪现在运动物体的前边还是后边(与运动方向一致的一边为前)。如果知觉中闪现物体和运动物体对齐,被试判断闪现物体在前的概率就应为随机水平,即50%。所以对应于该判断概率(50%)下的闪现物体和运动物体之间的真实夹角,即为闪现滞后的量。本实验中,闪现物体和运动物体之间的夹角有10种等差递增的角度,从 $-1.9^\circ$ 开始以步长约 $1.9^\circ$ 增长到 $+15.2^\circ$ 结束。“-”表示闪现物体出现在运动物体的后边,“+”反之,“0”表示物理上它们正好在一条直线上。每个试次由主试起动,试次间隔约为 $1 \sim 3 \text{ s}$ ,一共进行 $3$ (运动刺激) $\times 10$ (夹角) $\times 16$ (重复测量)=480次判断,且每80次有一次短暂休息。也就是说,被试对每种运动刺激条件下的每种角度做16次判断,从而得出每一个实验数据点(即

闪现物体领先于运动物体的判断的比例)。

## 3 结 果

12名被试的实验数据用SPSS的非线性回归功能处理,用累积高斯曲线进行拟合,结果显示,三种条件下有50%的概率判断闪现物体在旋转物体前所对应的角度,即闪现滞后的量,非常接近(图3),闪现滞后量在每种运动刺激条件下的平均



**Fig.3** Results and fitting curves. The data shows typical psychonomic functions, which are characterized by cumulative gaussians. The leading angles of subjective alignment are given by the intersection of the relevant fitted curve with the horizontal 50% line

---△--- Second-order motion  
—□— Luminance-defined motion  
—●— Motion-contrast-defined motion

均结果是,二阶运动: $7.39^\circ$ ,亮度定义一阶运动: $7.47^\circ$ ,运动对比度定义的一阶运动: $7.15^\circ$ 。进一步进行以运动刺激类型为因素的三个水平的单因素方差分析,结果主效应不显著, $F(2, 22) = 0.43$ , $P = 0.65$ ,表明三种条件下的闪现滞后量没有显著性差异。

## 4 讨 论

本实验的结果表明,二阶运动刺激和亮度定义一阶运动以及运动对比度定义的一阶运动刺激三者间的闪现滞后现象没有明显差别。如前言所述,视网膜的运动物体外推的机制不再适合于二阶运动刺激,即在二阶运动刺激条件下,没有视网膜运动外推机制的贡献,显著的闪现滞后现象

依然存在,而且和基于亮度定义的一阶运动刺激,即视网膜运动外推机制有效的情况下,没有显著的差别。这说明视网膜的运动外推机制并不是闪现滞后现象的主要机制,也就是说闪现滞后现象的机制不应该主要位于视网膜层次。

一阶运动和二阶运动的加工除了在视网膜层次上有差别外,在神经心理学研究中,有研究发现了只对二阶运动刺激的知觉有障碍,而对一阶运动刺激的知觉完好的脑损伤病人<sup>[13]</sup>。同样也发现了只对一阶运动刺激的知觉有障碍,而对二阶运动刺激的知觉完好的脑损伤病人<sup>[14,15]</sup>。在心理物理学实验研究中则发现对其中一种运动刺激的适应,并不影响另外一种运动刺激的检测域值<sup>[16]</sup>。一阶运动和二阶运动分别有各自的运动后效现象,而且不会交叉产生<sup>[17]</sup>。这些研究结果都提示一阶和二阶运动的加工是并行独立的。Lu等<sup>[18]</sup>还观察到,在将空间频率和时间频率完全相同但相对相位有变化的二阶运动刺激和一阶运动刺激叠加起来后让被试判断运动方向的任务中,只要两个运动成分的运动方向相同,则任务难度(运动刺激方向信号的强度)和两个分量之间的相对相位基本无关。如果两个刺激是先叠加后被一起加工的话,那么任务难度一定受相对相位的影响(即有些相对相位会降低刺激运动方向信号的强度,而有些会增强),实验结果说明初期一阶、二阶运动的加工是由两个独立的通道完成,每个通道负责各自刺激加工,所以信号的强度不受相对相位的影响。进一步的实验发现如果两个成分运动方向完全相反,则被试观察不到运动。这个结果说明两种刺激经过初期的独立加工后,视觉系统把能量相等、方向相反的两个运动信号抵消了,提示视觉系统中存在把一二阶运动加工通道的结果汇合的阶段。另外电生理实验中也在MT区观察到了对“形状不变”的各种物体的运动都起反应的神经元,不管该物体是由亮度定义的还是由二阶属性定义<sup>[19]</sup>。所以一般认为一阶和二阶运动的加工和检测是由两条并行的独立加工通道完成之后又汇合形成运动知觉<sup>[7,18]</sup>。本实验中测量的闪现滞后现象在一阶运动刺激和二阶运动刺激条件下没有明显的区别,这提示如果一、二阶运动刺激条件下的闪现滞后现象的机制是一样的,那么这个机制可能位于两种运动加工通道汇合阶段以上。这一点为将来进一步寻找闪现滞后现象的神

经机制提供了重要参考。

综上,本文说明闪现滞后现象并不是一阶运动加工系统独有的现象,在二阶运动刺激条件下也存在,而且和基于亮度定义的一阶运动刺激条件下的闪现滞后现象之间没有显著的差别。这表明视网膜的运动外推机制并不是闪现滞后现象的主要机制,也提示闪现滞后现象产生的机制有可能位于两种运动加工通道汇合阶段以上。

### 参考文献:

- [1] De Valois RL, de Valois KK. Vernier acuity with stationary moving Gabors. *Vision Research*, 1991, 31: 1619~1626
- [2] Nijhawan R. Motion extrapolation in catching. *Nature*, 1994, 370: 256~257
- [3] Krekelberg B, Lappe M. Neuronal latencies and the position of moving objects. *Trends Neurosci*, 2001, 24: 335~339
- [4] Berry MJ, Brivanlon IH, Jordan TA, Meister M. Anticipation of moving stimuli by the retina. *Nature*, 1999, 398: 334~338
- [5] Cavanagh P, Mather G. Motion: the long and the short of it. *Spatial Vision*, 1989, 4: 103~129
- [6] Chubb C, Sperling G. Drift-balanced random stimuli: a general basis for studying non-Fourier motion perception. *J Opt Soc Am A*, 1988, 5: 1986~2006.
- [7] Baker CL Jr. Central neural mechanisms for detecting second-order motion. *Curr Opin Neurobiol*, 1999, 9: 461~466
- [8] Zhou YX, Baker CL Jr. A processing stream in mammalian visual cortex neurons for non-Fourier responses. *Science*, 1993, 261: 98~101
- [9] Mareschal I, Baker CL Jr. A cortical locus for the processing of contrast defined contours. *Nature Neuroscience*, 1998, 1(2): 150~154
- [10] Baldo MVC, Klein SA. Extrapolation or attention shift? *Nature*, 1995, 378: 565~566.
- [11] Regan D, Beverley KI. Figure-ground segregation by motion contrast and by luminance contrast. *J Opt Soc Am A*, 1984, 1(5): 433~442
- [12] 朱滢. 实验心理学. 北京: 北京大学出版社, 2000. 69
- [13] Plant GT, Laxer KD, Barbaro NM, Schiffman JS, Nakayama K. Impaired visual motion perception in the contralateral hemifield following unilateral posterior cerebral lesions. *Brain*, 1993, 116: 1337~1353

- [14] Rademacher J, Galaburda AM, Kennedy DN, Pilipek PA, Caviness VS. Human cerebral cortex: localization, parcellation, and morphometry with magnetic resonance imaging. *J Cog Neurosci*, 1992, 4: 352~374
- [15] Vaina LM, Makris N, Kennedy D, Cowey A. The selective impairment of the perception of first-order motion by unilateral cortical brain damage. *Visual Neurosci*, 1998, 15: 333~348
- [16] Nishida S, Ledgeway T, Edwards M. Dual multiple-scale processing for motion in the human visual system. *Vision Res*, 1997, 37: 2685~2698
- [17] Lu ZL, Sperling G, Beck J. Selective adaptation of three motion systems. *Invest Ophthalmol Visual Sci (ARVO Suppl)*, 1997, 38: 237
- [18] Lu ZL, Sperling G. The functional architecture of human visual motion perception. *Vision Res*, 1995, 35: 2697~2722
- [19] Albright T. Form-cue invariant motion processing in primate visual cortex. *Science*, 1992, 255: 1141~1143

## FLASH LAG EFFECT IN THE SECOND-ORDER MOTION

LV Chun-li, LIU Zu-xiang

(Key Laboratory of Cognitive Science, Graduate School, Institute of Biophysics,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Flash lag effect describes a phenomenon that flash objects are perceived at a position behind physically aligned moving ones. Several contradictory explanations were proposed in recent years. The retina extrapolation proposal, based on a linear filter model, is the most competitive one to reach the neural mechanism of this effect. This proposal has been tested in the present study, in a second-order motion configuration, which was assumed to be irresolvable for the linear filter model. A luminance defined first-order motion and a motion-contrast defined first-order motion were used as control conditions. The results suggest that there was no significant difference between the amplitudes of the flash-lag effect in the second-order motion and in the first-order motion. This indicates that the retina extrapolation is not the main mechanism of the flash-lag effect. The results also suggest that the main mechanism of the flash-lag effect might locate above the combination of the first-order motion and the second-order motion computational channel.

**Key Words:** Flash-lag effect; Retina; Motion extrapolation; The first order motion;  
The second order motion