

一阶运动和二阶运动方向辨别的 知觉学习及传递性研究*

陈 荣 仇祝平 张 杨 周逸峰**

(中国科学技术大学生命科学学院视觉研究实验室, 合肥 230027)

摘要 为了明确视觉系统对一阶运动和二阶运动识别机制之间的相互关系, 采用一阶运动和二阶运动的正弦光栅刺激, 在旁中央凹对训练组(14 名被试)进行运动方向辨别的知觉学习训练. 通过比较训练前后的对比敏感度变化, 并同对照组(11 名被试)的结果比较后发现: a. 在旁中央凹, 一阶运动光栅方向辨别的训练提高了被试辨别一阶运动方向的能力, 但是这种提高的效果却不能传递到二阶运动光栅的方向辨别任务当中; b. 二阶运动光栅方向辨别的训练在提高被试二阶运动方向识别能力的同时, 也提高了被试在一阶运动光栅方向辨别任务中的表现. 这一训练效果的“非对称”传递现象提示, 人的视觉系统中存在两种不同的机制分别用于感知一阶运动和二阶运动, 但这两种机制并非截然不同, 而是部分分离的.

关键词 一阶运动, 二阶运动, 运动方向辨别, 知觉学习

学科分类号 R339.14+5

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2009.00224

人眼所见的环境图像信号中, 我们把有显著平均亮度变化的信号统称为一阶信号, 而将没有显著的平均亮度变化, 只有某些特征信息(如对比度或者纹理等)变化的信号称为二阶信号. 当一幅图像的平均亮度分布 $I_{\text{mean}}(x, y)$ 随着时间发生显著位移从而引起的运动感可称为一阶运动, 而当图像的平均亮度分布不随时间发生变化, 但更高阶的图像信息(如对比度分布 $\text{Contrast}(x, y)$)却随着时间发生位移从而引起的运动感则应称为二阶运动. 典型的一阶和二阶运动分别如图 1a, c 所示.

一阶运动信号常被用作视觉研究中的刺激信号, 一般认为它先要经过一批对亮度进行滤波的一阶线性滤波器(如 V1 区的空间频率和时间频率滤波器)的处理, 然后再进行后续的运动信号提取过程, 具体的运动计算模型包括 Reichardt 模型^[1, 2]和运动能量计算模型(motion energy computation, ME)^[3].

二阶运动信号是一种非线性信号, 早期研究指出这种信号的处理不能用传统的线性滤波模型(如 Reichardt 模型)来解释^[4]. 那么二阶运动到底是如何被我们的视觉系统所分析的呢? 它和一阶运动的处理通路之间又有什么关系呢? 许多心理物理学研究者们使用了多种不同的任务和刺激来对这一问题

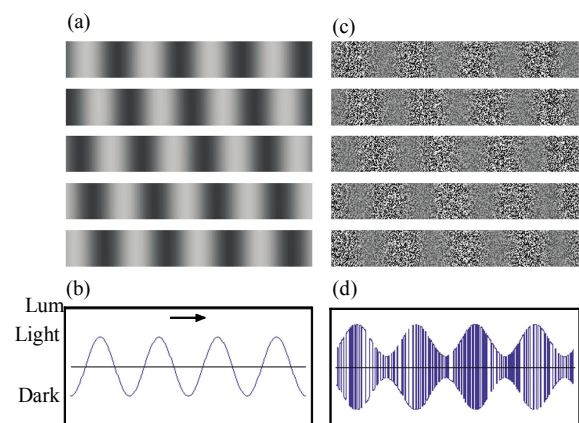


Fig. 1 Examples of first and second order motion

(a) Five consecutive frames of a first-order motion stimulus: a moving sine wave luminance modulation. (b) Luminance profile of the pixels in one row of (a). (c) Five consecutive frames of a second-order motion stimulus: a moving contrast modulation of a random-texture carrier. (d) Luminance profile of the pixels in one row of (c). To create second-order motion, first a noise frame (carrier) is made by assigning each pixel to be either light or dark randomly, and multiplied by a sine wave (modulator) (shown in d). Then the modulator is moved horizontally from frame to frame while the carrier noise remains stationary, thus second-order motion is produced.

* 国家自然科学基金重点资助项目(30630027).

** 通讯联系人.

Tel: 0551-3601436, Fax: 0551-3607014, E-mail: zhouy@ustc.edu.cn

收稿日期: 2009-04-10, 接受日期: 2009-06-22

进行研究. 一些研究者通过对运动速度辨别(speed discrimination)的研究^[5, 6]、运动匹配和适应性(speed matching and adaptation)的研究^[7, 8]等提出, 视觉系统识别一阶运动和二阶运动采用的是相同的机制. 但更多的研究报道, 例如对运动方向辨别(motion direction discrimination)的研究^[4, 9~11]、动态深度效应(kinetic depth effect)的研究^[12]、运动一致性(motion coherence)的研究^[13]等, 则支持一阶运动和二阶运动的识别过程中存在两种不同的机制. 总之, 对于视觉系统对一阶运动和二阶运动识别机制之间的相互关系还没有一个清楚的结论. 各研究者们分别从视觉计算、心理物理和生理学等不同角度对这一问题加以研究, 得出了各自的一些结论, 也提出了相应的识别模式, Clifford 等^[14]对此作了一个简单总结.

知觉学习指的是由训练所引起的感觉器官对外界环境反应能力的一种长时程改变^[15], 其被广泛认为反应了大脑的可塑性. 知觉学习可用于研究运动识别机制, 本文中, 我们在旁中央凹对两组被试分别进行光栅一阶和二阶运动方向辨别的知觉学习训练. 通过比较训练前后的对比敏感度变化, 以及训练效果有没有在一阶运动和二阶运动之间相互传递, 我们试图回答两个问题: a. 视觉系统对一阶运动和二阶运动的识别是由相同还是不同的机制所介导? b. 如果存在两种不同的识别机制, 那么这两种机制是截然不同的呢还是部分分离的? 我们认为, 如果一阶运动和二阶运动存在相同的识别机制, 那么训练效果将在这两者之间进行完全的传递, 而如果存在两种截然不同的识别机制, 那么训练效果将不会在一阶运动和二阶运动之间传递. 通过这样的知觉学习研究, 结合相关电生理学及脑成像学等研究结果, 可望加深人们对一阶运动和二阶运动识别机制的理解.

1 实验方法

1.1 被试

被试为 25 名中国科学与技术大学在校学生, 年龄 20~28 岁(17 男 8 女). 所有被试的视力或矫正视力正常(不低于 1.0), 在实验前签署知情同意书.

1.2 实验设备及视觉刺激

实验所用到的视觉刺激呈现于 17 英寸 Sony G220 显示器上, 由 Matlab7.0 环境下调用

Psychtoolbox2.54 工具箱^[16, 17]实现, 驱动显卡为 ATI 7500. 实验还采用了一个特殊的电路装置^[18]来产生 14 位灰度等级的高精细对比度的刺激图像.

屏幕分辨率为 640×480 像素, 刷新频率为 160 Hz, 平均亮度为 50 cd/m^2 . 被试与屏幕的距离为 1.14 m. 被试注视于屏幕的正中央, 那里呈现一个 $0.144^\circ \times 0.288^\circ$ 视角大小的字符: 'S' 或者 '5'. 运动光栅刺激为圆形, 直径 2.0° , 呈现于屏幕右下方的一个方框内, 圆心距中央注视点的距离为水平 3.1° 、竖直 2.3° , 如图 2 所示. 圆外面的方框用于在刺激开始前提示被试刺激即将出现的位置. 为了降低边缘效应的影响, 我们还对刺激所在圆形内的

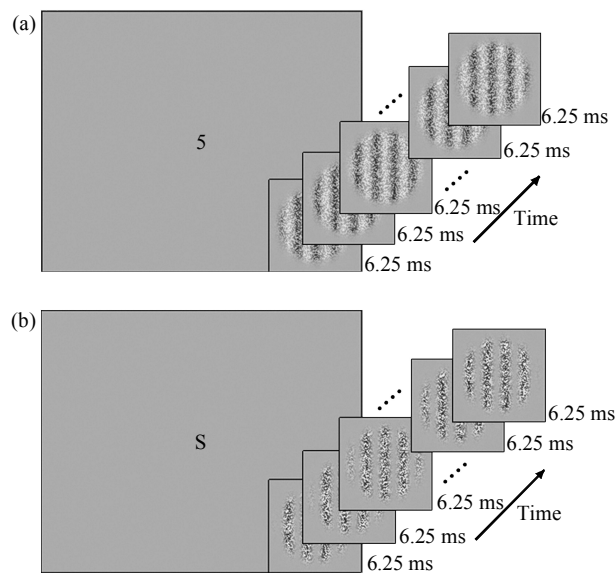


Fig. 2 Stimuli used in the experiment

(a) 40 consecutive frames of first-order motion gratings embedded in external noise. (b) 40 consecutive frames of second-order motion gratings.

0.3° 的环形周边进行了模糊.

一阶运动刺激为水平运动的垂直正弦光栅, 在无噪音情况下, 刺激的亮度满足:

$$I = I_0 \{1 + c \sin[2\pi(fx \pm \omega t) + \phi]\} \quad (1)$$

这相当于图 1a 中一阶运动示意图中的情况, 而在图 2a 中正式实验所用到的二阶运动刺激是包含有噪音的, 其亮度满足:

$$I = 0.5 \times I_0 \times n + 0.5 \times I_0 \{1 + c \sin[2\pi(fx \pm \omega t) + \phi]\} \quad (2)$$

(1)、(2)式中, I_0 代表平均亮度, c 代表光栅的

对比度, f 代表光栅的空间频率(2 周期 / 度), ϕ 代表初始的随机相位, n 代表均匀分布的白噪音, ω 代表时间频率, 在实验的训练部分 ω 固定为 8.0 Hz, 而在测试部分 ω 则有 2、4、8、14、21 和 30 Hz 共 6 种取值.

二阶运动光栅刺激是通过随机纹理载波进行对比度调制来产生的, 其亮度满足:

$$I = I_0 \{1 + n \times [1 + c \sin(2\pi(fx \pm \omega t) + \phi)]\} \quad (3)$$

式中 I_0 、 c 、 f 、 ω 和 ϕ 的定义与(1)、(2)式中相同, n 也同(2)式中一样, 是一个二维的均匀分布的白噪音(随机指定每一个象素点为最亮点或最暗点). 由(3)式可见, 由静止的二维噪音 n 所构成的随机纹理载波, 其对比度被正弦变化的包络函数 $c \sin[2\pi(fx \pm \omega t) + \phi]$ 所调制, 并且这一调制函数还在作水平方向的运动, 运动的时间频率 ω 在实验的训练部分固定为 8.0 Hz, 而在测试部分 ω 则有 2、4、8、14、17 和 21 Hz 共 6 种取值.

测试时二阶刺激选取的时间频率之所以与一阶刺激不同, 这是因为二阶辨别任务比一阶任务更难, 在最初的预实验中, 我们发现被试能够顺利完成二阶辨别任务的截止时间频率上限要低于一阶辨别任务. 即在最难的 30 Hz 下, 被试基本上能看清以 30 Hz 速率运动的一阶光栅, 但几乎所有被试都报告说完全看不清以 30 Hz 速率运动的二阶光栅. 所以我们只好降低测试时二阶刺激的最高时间频率, 通过尝试选取了一个相对合适的、被试还能看清的 21 Hz.

1.3 实验设计

实验分为三组进行, 将 25 名被试随机分为三组: 8 人进行正弦光栅一阶运动方向辨别的训练, 6 人进行正弦光栅二阶运动方向辨别的训练, 另外 11 人作为对照组不参加训练. 所有实验都在同一间暗室里完成, 而且要求被试仅用主视眼来观察屏幕作出判断, 另一只眼用不透明眼罩遮起来.

对一阶和二阶训练组, 整个实验包括 3 个过程: 训练前测量、训练及训练后测量. 训练前, 对所有被试, 在主视眼分别测量光栅一阶运动和二阶运动方向辨别的对比度阈值(contrast threshold). 之后将这两组被试分开来进行光栅一阶运动和二阶运动方向辨别的训练, 训练在时间频率 8 Hz 下进行, 每次训练持续约 40 min, 每天训练一次, 共训练 7 天. 训练后测量与训练前测量相同, 也是分别测量所有被试对光栅两种运动方向辨别的对比度阈值,

以检验训练的效果, 以及这一效果有没有在一阶运动和二阶运动之间发生传递. 在第一次测试前, 被试通过 60 次作业(trials)来熟悉实验操作.

对照组的被试不参加训练, 只进行前后相隔 7 天的两次测量(同训练组在训练前后所进行的测量是一样的).

1.4 实验流程

这是一个“双任务”的实验, 在每个作业中, 屏幕中央随机呈现一个字母‘S’或‘5’, 同时右下方的小方框内呈现一个随机向左或是向右运动的光栅(字母和光栅的呈现时间均为 250 ms). 之后被试需要按键两次来回答两个问题: 第一次按键判断屏幕中央的字母是‘S’还是‘5’, 第二次按键判断右下方的光栅是向左还是向右运动, 判断完成后随即呈现下一个作业. 由于字母‘S’和‘5’的字形比较相似, 所以被试需要注视于屏幕的中央才能较好地完成任务, 这样保证了右下方的光栅是呈现在被试的旁中央凹. 在实验的训练阶段, 对每个任务而言, 如果被试回答正确则出现提示音, 回答错误则没有提示音, 以此给出反馈信息, 而在测量阶段则没有提示信息.

对比度阈值采用 2 进 1 (two-down one-up) 阶梯法测量: 当被试连续两次回答正确光栅的运动方向后(不考虑字母判断是否正确), 降低光栅的对比度($c_{n+1}=0.9c_n$); 而错误回答一次运动方向则增加光栅的对比度($c_{n+1}=1.1c_n$). 最终被试的平均正确率(方向辨别任务)稳定在 70.7%. 在训练前和训练后的测量阶段中, 我们通过 600 次作业来测量被试在 6 个时间频率下运动方向辨别的对比度阈值(100 trials/ff). 测量时各时间频率下光栅的初始对比度为: 一阶光栅(0.15, 0.11, 0.11, 0.14, 0.2, 0.6), 二阶光栅(0.6, 0.5, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9). 这些值是根据经验选取的对被试而言难度适中的初始值(对比度 c 越高任务就越容易, 实验中 c 值最高能调到 1.0). 每次训练也包含 600 次作业, 平均分为 6 组(blocks), 被试可根据自己的需要选择在组间是否休息. 训练第一天光栅的初始对比度为: 一阶光栅 0.11, 二阶光栅 0.4. 之后将每天训练最后一次作业的对比度作为第二天训练时光栅的初始对比度.

当被试完成一次测试或训练后, 在每个时间频率下, 我们会得到一个被试完成的作业中光栅对比度值的列表, 在测试的每个时间频率下, 这是一个包含 100 个数的数列, 而在训练的 8 Hz 下, 这是

一个包含 600 个数的数列. 在这些数列中, 我们定义“拐点”为当光栅的对比度值从下降转成上升, 或者从上升转成下降时候的点. 在扣除前 3 个(如果该数列中总拐点数奇数)或 4 个(如果该数列中总拐点数偶数)拐点后, 我们将剩余拐点处对比度值的平均值定义为光栅运动方向辨别的对比度阈值, 此阈值的倒数即为对比敏感度(contrast sensitivity), 结论中的对比敏感度均用此方法得到.

2 实验结果

在屏幕中央‘S’和‘5’的字母辨别任务中, 所有被试的平均正确率为 $(95.7 \pm 3.3)\%$. 这一较高的正确率说明他们在实验中双眼是按照要求注视于屏幕正中央的, 以下实验结果是在旁中央凹获得.

2.1 一阶运动训练结果

正弦光栅一阶运动方向辨别的训练结果如图 3 所示. 图 3a 是被试在训练时间频率 8 Hz 下的平均学习曲线, 横坐标表示天数, 纵坐标表示每天所测得的对数形式的对比敏感度. 对这一学习曲线作线性回归, 得到 8 Hz 下被试对比敏感度提高的平均速度(即回归直线的斜率)为 0.17 lg Unit/lg sessions, 提高的最终效果是显著的(8 名被试 8 Hz 下训练前后相比较, 配对 t - 检验, $t(7) = 7.52$, $P < 0.01$). 训练还可提高非训练时间频率下被试的对比敏感度, 通过与 8 Hz 下类似的分析得出, 训练后被试的对比敏感度在其他所有时间频率下都得到了显著性提高(图 3b). 另外, 将所有时间频率综合考虑, 采用 within-subject ANOVA 分析也显示, 训练显著提高了被试对一阶运动方向的对比敏感度($F(1, 7) = 56.6$, $P < 0.01$). 提高的平均幅度为 1.80 dB (range: 1.00~2.24 dB; $SE=0.18$ dB). 与此同时, 被试对二阶运动方向的对比敏感度在训练后也得到了小幅度提高(图 3c, within-subject ANOVA 分析显示有显著性提高, $F(1, 7) = 8.24$, $P = 0.024$), 提高的平均幅度为 0.52 dB (range: 0.25~0.91 dB; $SE=0.10$ dB), 由于这一提高幅度并不是很大(注意图 3b 和图 3c 中纵坐标的比例尺不同), 我们推测有两种可能的原因引起了被试二阶运动对比敏感度的提高: a. 一阶运动训练的效果传递到了二阶运动; b. 训练前后所进行的两次二阶对比敏感度的测量本身引起了被试二阶对比敏感度的提高. 在此我们无法肯定究竟是哪一种原因引起的, 需要结合 2.3 节中对照组被试的结果才能得出进一步的结论.

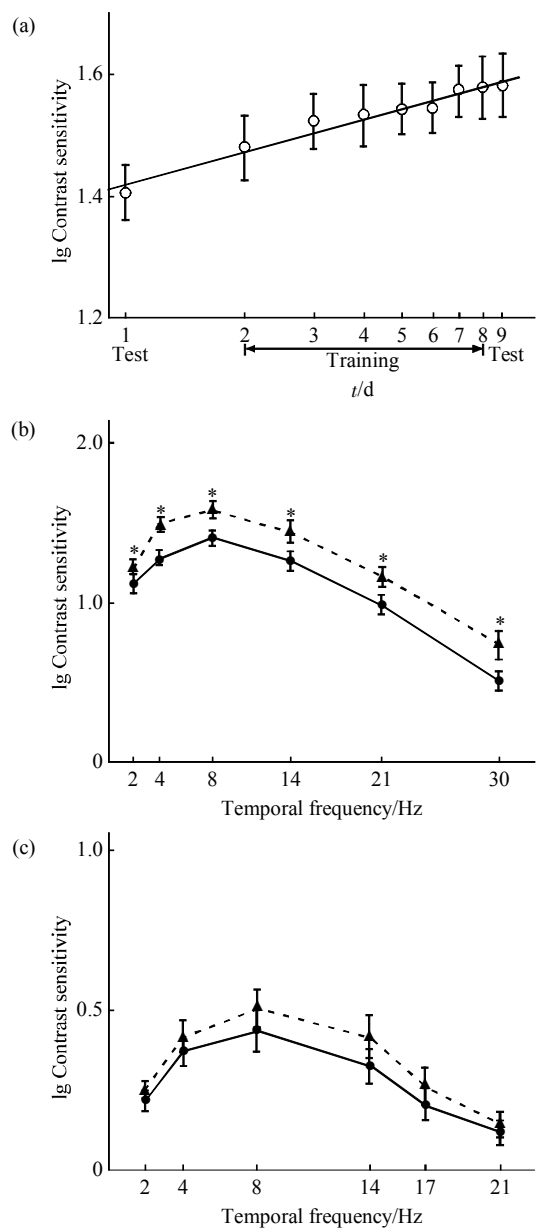


Fig. 3 The results of training with first-order motion gratings

Mot.1, 1st order motion; Mot.2, 2nd order motion; CS, contrast sensitivity; Before, before training; After, after training. (a) Subjects' average learning curve ($\bar{x} \pm s$) under 8Hz first-order motion training. $\circ-\circ$: 1st order learning curve. $r = 0.981$, $P < 0.0001$, Slope: 0.17. (b) Under all the tested temporal frequencies, subjects' general sensitivity for first-order motion was significantly improved by training. $\bullet-\bullet$: Mot.1 CS before; $\blacktriangle-\blacktriangle$: Mot.1 CS after. $*P < 0.05$. (c) Subjects' sensitivity for second-order motion was slightly improved at the same time. $\bullet-\bullet$: Mot.2 CS before; $\blacktriangle-\blacktriangle$: Mot.2 CS after.

2.2 二阶运动训练结果

正弦光栅二阶运动方向辨别的训练结果如图 4 所示: 在训练时间频率 8 Hz 下, 被试对比敏感度提高的平均速度为 0.18 lg Unit/lg sessions(图 4a),

提高的效果是显著的 ($t(5) = 2.93$, $P = 0.032$). 在其他时间频率下, 除最低频率 2 Hz 和最高频率 21 Hz 以外, 训练都显著提高了被试对二阶运动方向的对比敏感度(图 4b). Within-subject ANOVA 分析也显示有显著性提高 ($F(1,5) = 9.38$, $P = 0.028$), 提高的平均幅度(对所有时间频率而言)为 1.98 dB (range: 0.81~2.79 dB; $SE = 0.28$ dB). 与此同时,

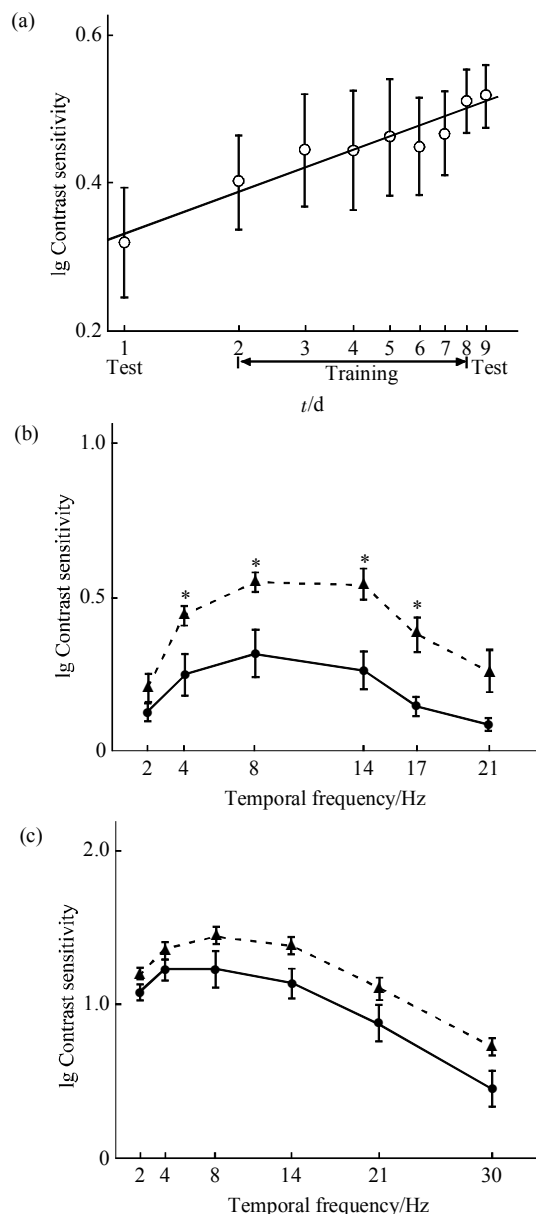


Fig. 4 The results of training with second-order motion gratings

(a) Subjects' average learning curve under 8Hz second-order motion training. ○—○: 2nd order learning curve. $r = 0.961$, $P < 0.0001$, Slope: 0.18. (b) Under all the tested temporal frequencies except 2 Hz and 21 Hz, training significantly improved subjects' general sensitivity for second-order motion. ▲—▲: Mot.2 CS before; ●—●: Mot.2 CS after. $*P < 0.05$. (c) Meanwhile, subjects' performance in first-order motion task was significantly improved at the same time. ●—●: Mot.1 CS before; ▲—▲: Mot.1 CS after.

被试对一阶运动方向的对比敏感度在训练后也得到显著提高(图 4c, Within-subject ANOVA 分析, $F(1,5) = 17.5$, $P < 0.01$), 提高的平均幅度为 2.03 dB (range: 1.17~2.70 dB; $SE = 0.26$ dB). 关于二阶运动的训练效果是否传递到了一阶运动, 我们也在 2.3 节中结合对照组被试的结果再作进一步的分析.

2.3 对照组被试的结果

对照组的实验结果如图 5 所示: 图 5a 是被试的一阶运动对比敏感度在前后相隔 7 天的两次测量中的变化情况, within-subject ANOVA 分析显示, 第二次测量相对于第一次有显著性提高 ($F(1,10) = 11.2$, $P < 0.01$), 提高的平均幅度为 0.75 dB (range: 0.43~1.04 dB; $SE = 0.09$ dB).

图 5b 是对照组被试的二阶运动对比敏感度在前后两次测量中的变化情况, within-subject ANOVA 分析显示, 第二次测量相对于第一次的提高非常接近于显著水平 ($F(1,10) = 4.43$, $P = 0.062$),

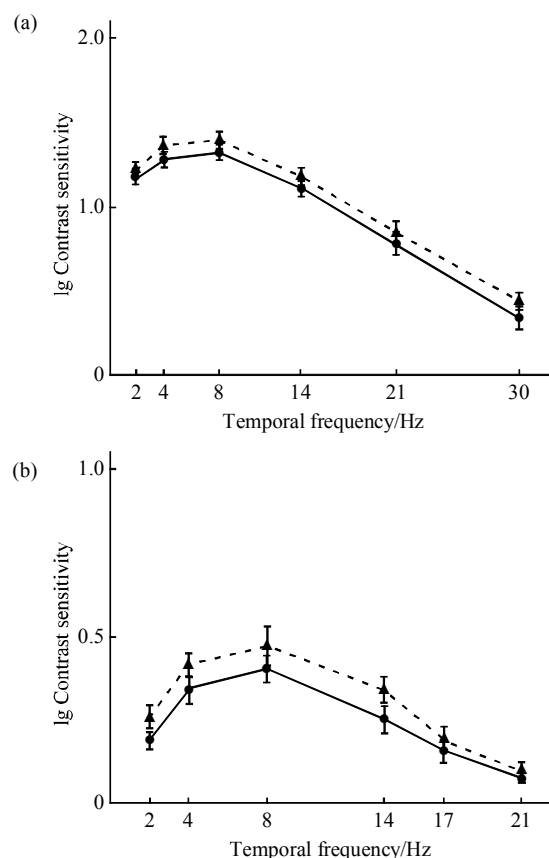


Fig. 5 The results of the control group

(a) After 7 days of no training at all, subjects' general sensitivity for first-order motion was significantly higher when measured at the second time than the first time. ●—●: Mot.1 CS before; ▲—▲: Mot.1 CS after. (b) Subjects' sensitivity for second-order motion was marginally higher when taking the second measure than the first one. ●—●: Mot.2 CS before; ▲—▲: Mot.2 CS after.

提高的平均幅度为 0.60 dB (range: 0.21 ~ 0.89 dB; $SE = 0.11$ dB).

另外, 将一阶训练组同对照组相比较, 二者在训练前(第一次)测量中的一阶对比敏感度没有显著性差异(Between-subject ANOVA, $F(1,17) = 2.56$, $P = 0.13$), 二阶对比敏感度也没有显著性差异($F(1,17) = 1.24$, $P = 0.28$). 类似地, 二阶训练组同对照组相比较, 二者在训练前测量中的一阶对比敏感度(Between-subject ANOVA, $F(1,15) = 0.004$, $P > 0.5$)和二阶对比敏感度($F(1,15) = 0.85$, $P = 0.37$)也都没有显著性差异.

图 5a 和图 5b 显示即使不经过 7 天的训练, 被试在第二次测量中的表现相对于第一次也有小幅度的提高, 这是由什么原因引起的呢? 我们推测这是由程序性学习和早期知觉学习共同作用的结果, 程序性学习是指被试在完成任务所必需的一些因素上的学习, 如对实验环境、按键、实验任务和流程等的熟悉而引起被试表现的提高. 另外, 对照组实验中被试在完成第一次测量的 600 次作业后, 其实也同时得到了训练, 因此早期的知觉学习就在此发生了. 知觉学习在早期就会非常迅速地开始发生^[9], 并不一定需要多天的训练才会开始显现效果. 比如在二阶训练组中, 图 4a 显示, 经过 7 天的训练后, 训练组被试的表现有大幅度地提高, 但由图 4 也可见即使只经过 1 天的训练, 被试的表现相对训练前已经有一个小幅度的提高了.

将一阶训练组的结果同对照组比较, 一阶对比敏感度的提高幅度(1.80 dB *vs.* 0.75 dB)差别较大, 说明 7 天的一阶运动训练的效果是显著的, 二阶对比敏感度的提高幅度(0.52 dB *vs.* 0.60 dB)差别不大, 我们推测对一阶训练组而言, 这是由训练前后的两次测量本身所引起的, 而不是由 7 天的一阶运动的训练效果传递过来的, 即一阶运动的训练效果不能传递到二阶运动.

将二阶训练组的结果同对照组相比较, 二阶对比敏感度的提高幅度(1.98 dB *vs.* 0.60 dB)差别较大, 说明 7 天的二阶运动训练的效果是显著的, 一阶对比敏感度的提高幅度(2.03 dB *vs.* 0.75 dB)差别也较大, 因此我们推测, 二阶运动的训练效果传递到了一阶运动.

综上所述, 我们得出如下结论: 训练效果在一阶运动和二阶运动之间发生了“非对称”的传递, 即一阶运动的训练并不能显著影响到被试辨别光栅二阶运动方向的能力, 但是二阶运动的训练却能够

同时显著地提高被试在光栅一阶运动方向辨别任务中的表现.

3 讨 论

3.1 总结

在本次工作中, 我们将参加训练的被试分为两个小组, 在固定空间频率(2 周期/度)和时间频率(8 Hz)下分别进行正弦光栅一阶运动和二阶运动方向辨别的训练. 通过 7 天的训练, 分别提高了被试对光栅一阶运动和二阶运动方向辨别的对比敏感度, 并且这种提高的效果在一阶运动和二阶运动之间发生了“非对称”的传递. 这一现象提示我们, 人的视觉系统中存在两种不同的机制分别用于感知一阶运动和二阶运动, 但这两种机制并非截然不同, 而是部分分离的.

3.2 选择在旁中央凹进行实验的原因

在最近 Doshier 等^[20]的研究中, 他们在中央凹, 采用一阶(由亮度变化所定义)和二阶(由纹理变化所定义)字母 K 的方位辨别任务来进行知觉学习训练, 训练结果为: 在中央凹知觉学习无法提高被试的一阶任务成绩, 但却提高了被试在二阶任务中的表现. 在中央凹采用低阶的、比较简单的任务来进行知觉学习训练通常无法提高被试成绩, 或者只能取得很小幅度的提高, 这一点得到了许多研究结论的支持^[21~23]. 我们尚不清楚这一现象的真正原因, 但这很可能同中央凹最优化的空间分辨能力和视锐度有关. 考虑到旁中央凹是“尚未最优化”的视区, 因此我们尝试在旁中央凹来进行光栅一阶和二阶运动方向辨别的训练, 结果显示一阶和二阶运动的训练都提高了被试相应的对比敏感度成绩.

3.3 “非对称”传递现象可能的解释及知觉学习发生的可能位点

被试在完成二阶运动的训练之后, 对一阶运动方向的辨别能力也得到了明显提高. 这提示我们二阶运动信号的处理通路可能“包含”了一阶信号通路的关键部分. 而被试在经过一阶运动的训练之后, 对二阶运动方向的辨别能力却并没有显著性影响, 这说明二阶运动信号的处理通路同一阶信号通路之间有不同之处. 所以综合这两点, 关于处理一阶和二阶运动信号的具体模型, 我们的结论比较支持最早由 Wilson 和 Zanker 等^[24, 25]从生理学角度率先提出的一种部分分离的“双层”模型, 图 6 是为了更加形象化而对其修改后的模式图: 左边的是一阶运动信号的处理通路, 右边的是二阶运动信号的

处理通路, 它们呈现部分分离的状态. 在前期两种运动信号都需要经过一批简单的针对亮度信息的一阶线性滤波器的处理, 之后它们的通路分离开来, 二阶运动信号作为一种非线性信号, 还需要经过一个总的非线性转换过程(如全波整流 rectification), 然后再通过一批针对对比度和纹理信息的二阶线性

滤波器的处理. 最后, 一阶和二阶运动信号都通过相应的模板分析(template analysis)进而做出决策. 亮度信息的一阶滤波发生在 V1 区, 对比度和纹理信息的二阶滤波很可能发生在 V2~V4 之间的高级视区^[26, 27].

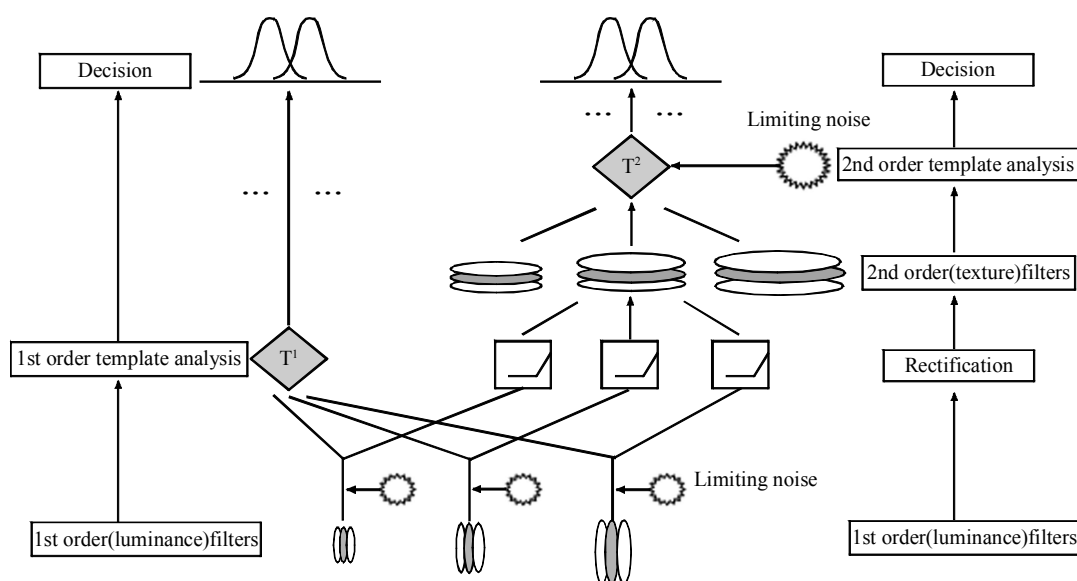


Fig. 6 A partly separated, two-layer model for processing of first- and second-order motion signals

First of all, both kinds of motion signals are filtered by a group of first-order luminance filters at V1. Then the two pathways for first- and second-order motion processing are separated from each other. Second-order motion signals go on to a non-linear rectification process, and then are further filtered by a group of second-order texture (or contrast) filters probably at V2 or higher. Finally, through respective template analysis, both first- and second-order motion signals come up to its final decision. (Modified from Doshier, Lu Z L, 2006)

光栅一阶和二阶运动方向辨别的知觉学习究竟发生在视通路的哪一个层次? 它们的学习效果为什么又会发生“非对称”的传递呢? 在图 6 的“双层”模型框架下, 对上述问题可以给出一个比较合理的解释. 将图 6 中一阶亮度滤波器所在的层称为一阶信号处理层, 非线性的全波整流转换和二阶对比度、纹理滤波器所在的层称为二阶信号处理层. Doshier 等^[20]认为, 在原始的自然状态下, 我们有理由相信, 由于缺乏相应的针对性训练, 以及内部和外部噪声的存在, 这两层滤波器的处理效能, 以及滤波之后同下一级处理模板之间的神经元连接, 针对某一项具体的任务(如本实验中的方向辨别任务)都还没有达到最优化的程度, 这正是知觉学习可对其加以重新塑造的地方. 我们由此推测, 实验中一阶运动的训练优化了一阶亮度滤波器及其与后续处

理单元之间的神经元连接, 抑制了这里的噪声从而放大了输入信号, 但却没有影响到二阶信号处理层中各单元的效能(而这对二阶运动信号的处理是非常关键的), 所以最后表现为一阶运动方向辨别能力的提高, 但却无法影响被试者辨别光栅二阶运动方向的能力. 相应地, 由于二阶运动信号的处理需要同时用到一阶信号和二阶信号处理层中的各个单元, 实验中二阶运动的训练亦同时优化了这两层中各处理单元的效能, 所以最后表现为二阶运动方向辨别能力增强的同时, 也显著提高了被试在一阶运动方向辨别任务中的表现.

参 考 文 献

- 1 Reichardt W. Autokorrelationsauswertung als funktionsprinzip des zentralnervensystems. Z Naturforsch, 1957, **12b**: 447~457
- 2 Santen J P H v, Sperling G. Temporal covariance model of human

- motion perception. *J Opt Soc Am A*, 1984, **1**(5): 451~473
- 3 Adelson E H, Bergen J R. Spatio-temporal energy models for the perception of motion. *J Opt Soc Am A*, 1985, **2**(2): 284~299
 - 4 Derrington A M, Badcock D R, Henning G B. Discriminating the direction of second-order motion at short stimulus durations. *Vision Res*, 1993, **33**(13): 1785~1794
 - 5 Benton C P, Johnston A, McOwan P W. Perception of motion direction in luminance- and contrast-defined reversed-phi motion sequences. *Vision Res*, 1997, **37**(17): 2381~2399
 - 6 Johnston A, Benton C P. Speed discrimination thresholds for first- and second-order bars and edges. *Vision Res*, 1997, **37**(16): 2217~2226
 - 7 Johnston A, Clifford C W. Perceived motion of contrast-modulated gratings: predictions of the multi-channel gradient model and the role of full-wave rectification. *Vision Res*, 1995, **35**(12): 1771~1783
 - 8 Turano K, Pantle A. On the mechanism that encodes the movement of contrast variations: Velocity discrimination. *Vision Res*, 1989, **29**(2): 207~221
 - 9 Chubb C, McGowan J, Sperling G, *et al.* Non-Fourier motion analysis. *Ciba Found Symp*, 1994, **184**: 193~205
 - 10 Mather G, Tunley H. Motion detection in interleaved random dot patterns: evidence for a rectifying nonlinearity preceding motion analysis. *Vision Res*, 1995, **35**(15): 2117~2125
 - 11 Solomon J A, Sperling G. Full-wave and half-wave rectification in second-order motion perception. *Vision Res*, 1994, **34**(17): 2239~2257
 - 12 Doshier B A, Landy M S, Sperling G. Kinetic depth effect and optic flow--I. 3D shape from Fourier motion. *Vision Res*, 1989, **29**(12): 1789~1813
 - 13 Edwards M, Nishida S. Contrast-reversing global-motion stimuli reveal local interactions between first- and second-order motion signals. *Vision Res*, 2004, **44**(16): 1941~1950
 - 14 Clifford C W, Vaina L M. A computational model of selective deficits in first and second-order motion processing. *Vision Res*, 1999, **39**(1): 113~130
 - 15 Goldstone R L. Perceptual learning. *Annu Rev Psychol*, 1998, **49**: 585~612
 - 16 Brainard D H. The Psychophysics Toolbox. *Spat Vis*, 1997, **10**(4): 433~436
 - 17 Pelli D G. The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies. *Spat Vis*, 1997, **10**(4): 437~442
 - 18 Li X, Lu Z L, Xu P, *et al.* Generating high gray-level resolution monochrome displays with conventional computer graphics cards and color monitors. *J. Neurosci. Methods*, 2003, **130**(1): 9~18
 - 19 Hawkey D J, Amitay S, Moore D R. Early and rapid perceptual learning. *Nat Neurosci*, 2004, **7**: 1055~1056
 - 20 Doshier B A, Lu Z L. Level and mechanisms of perceptual learning: Learning first-order luminance and second-order texture objects. *Vision Res*, 2006, **46**(12): 1996~2007
 - 21 Dorais A, Sagi D. Contrast masking effects change with practice. *Vision Res*, 1997, **37**(13): 1725~1733
 - 22 Furmanski C S, Schluppeck D, Engel S A. Learning strengthens the response of primary visual cortex to simple patterns. *Curr Biol*, 2004, **14**(7): 573~578
 - 23 Lu Z L, Doshier B A. Perceptual learning retunes the perceptual template in foveal orientation identification. *J Vision*, 2004, **4**(1): 44~56
 - 24 Wilson H R, Ferrera V P, Yo C. A psychophysically motivated model for two-dimensional motion perception. *Visual Neuroscience*, 1992, **9**(1): 79~97
 - 25 Zanker J M. Second-order motion perception in the peripheral visual field. *J Opt Soc Am A*, 1997, **14**(7): 1385~1392
 - 26 Baker C L, Mareschal I. Processing of second-order stimuli in the visual cortex. In: Casanova C, Ptito M, eds. *Progress in Brain Research*, 134. Amsterdam Holland: Elsevier Science B.V, 2001. **12**: 11~21
 - 27 Landy M S, Graham N V. Visual perception of texture. In: Chalupa L M, Werner J S, eds. *The Visual Neurosciences*. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 1106~1118

Perceptual Learning and Transfer Study of First- and Second-order Motion Direction Discrimination*

CHEN Rong, QIU Zhu-Ping, ZHANG Yang, ZHOU Yi-Feng**

(Vision Research Laboratory, School of Life Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract In order to investigate the interactions between first- and second-order motion perception systems, 14 adult subjects with normal or correct to normal visual acuity were recruited and divided into two groups. Then these two groups were trained, in their parafovea, to discriminate the direction of first- and second-order motion gratings respectively. The spatial frequency of the gratings used in study was fixed at 2 cycles/degree and the temporal frequency was fixed at 8 Hz during training. Contrast sensitivity of subjects in these two training groups for first- and second- order motion was measured before and after 7 days' training to estimate the effects of training. In addition, the differences between the two training groups(14 subjects) and another control group (11 subjects) were studied. The results showed that: 1) the training with first-order motion gratings can improve subjects' performance in first-order motion direction discrimination but the improvement can't be transferred to the performance in second-order motion task; 2) the training with second-order motion gratings can improve subjects' performance in both first- and second-order motion direction discrimination tasks. In conclusion, an "asymmetric transfer" occurred between the training effect of first- and second-order motion gratings. These results indicate that there are two mechanisms for perceiving first- and second-order motion respectively. However, they are not completely different from each other but only partly separated.

Key words first-order motion, second-order motion, motion direction discrimination, perceptual learning

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2009.00224

*This work was supported by a grant from The National Natural Science Foundation of China (30630027).

**Corresponding author.

Tel: 86-551-3601436, Fax: 86-551-3607014, E-mail: zhouy@ustc.edu.cn

Received: April 10, 2009 Accepted: June 22, 2009