

基于心理物理学的弱视辅助检查方法^①

兰元钢¹ 邱飞岳² 陈宏³ (1.浙江工业大学 信息学院 浙江 杭州 310014; 2.浙江工业大学 教育技术研究所 浙江 杭州 310014; 3.浙江工业大学 智能信息处理研究所 浙江 杭州 310014)

摘要: 弱视是一种由于视觉系统发育障碍所引起,且不能通过光学途径以及手术加以矫正的视功能缺损,我国弱视检出率高达2.8%。弱视是一种发育性疾病,早期发现尽早治疗效果较好,因此,针对弱视的发病机制,借助心理物理学方法,设计一种检查方法帮助医生早期诊断病情,从而制定有效的个性化治疗方案具有重要的意义。运用 Matlab7.0 与 Psychophysics Toolbox2.5 设计并实现了以 Gabor 为刺激源,用于检查弱视患者对比敏感度和拥挤效应的新方法。经临床试用,这种检查方法操作简单、方便,对于进一步检查和诊断弱视患者的视功能缺损具有重要的意义。

关键词: 弱视; 视锐度; 对比敏感度; 拥挤效应

Amblyopia Assistant Examination Method Based on Psychophysics

LAN Yuan-Gang¹, QIU Fei-Yue², CHEN Hong³ (1.College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2.Educational Technology Institute, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3.Institute of Intelligent Information Processing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Amblyopia is a developmental visual disorder characterized by reduced vision in the absence of any detectable structural or pathological abnormalities that can not improve with refractive correction, there are about 2.8% of people in China have amblyopic disease. Amblyopia is a developmental disease, it will be better to detect and treat as soon as possible, therefore, according to the mechanism of amblyopia, use psychophysical methods, design an examination method to help doctors to diagnose the disease earlier, and make better treatment subjects for the patients will have important meaning. In this paper, Matlab7.0 and Psychophysics Toolbox2.5 are adopted to design and implement a new method based on Gabor stimulus which used for detecting contrast sensitivity and crowding effect in amblyopia. The clinical trails show that the examination method is simple and convenient, it has important meaning to detect and examin different vision functions of amblyopia.

Keywords: amblyopia; visual acuity; contrast sensitivity; crowding effect

1 引言

弱视是一种发育紊乱性疾病,是由于先天性或在视觉系统发育关键期内受到某些因素(如斜视、屈光不正、先天性白内障等)的干扰,导致进入眼内的光刺激不足,视细胞无法获得有效刺激,从而剥夺黄斑清晰

成像的机会所造成的视力减退^[1],我国弱视检出率高达2.8%^[2]。

目前弱视检查方法主要分为电生理检查法和心理物理学检查法。电生理检查的优点是客观、准确,但设备价格昂贵,操作复杂;心理物理学检查则

^① 基金项目:浙江省自然科学基金(R2080100);浙江省科技计划项目(2008C23076)

收稿时间:2010-03-04;收到修改稿时间:2010-04-06

简单、方便,在视功能检查领域应用广泛。然而传统的心理物理学检查方式多以纸制图表为刺激源,采用人工的方式进行判断和记录检查结果,使得检查结果受主观因素影响较大且不利于结果的分析。

本文在 Levi 和 Pelli 等人研究的基础上,采用心理物理学方法,运用 Matlab7.0 与 Psychophysics Toolbox2.5 设计并实现了一种以 Gabor 为刺激源,用于检查弱视对比敏感度和拥挤效应的新方法,这对于进一步检查和诊断弱视患者的视功能缺损具有重要的意义。

2 相关理论

2.1 心理物理学方法

费希纳创立的心理物理学是关于外界物理刺激和心理现象之间的函数关系或依存关系的一门科学,它是介于心理学和物理学之间的边缘学科^[3]。心理物理学研究心理事件与物理事件之间的关系,专门研究刺激是如何引起反应的,对某些心理现象变化原理获得确切了解,为解释、预测、控制某些心理现象提供了许多可能^[3]。由于心理物理学方法简单、方便,因此广泛应用于视功能检查领域。

2.2 对比敏感度检查

临床上用于检查弱视患者视锐度的视力表,是由不同大小的高对比度的字母或数字组成,因此视力表只是测定人眼在高对比度下识别不同空间频率视标的的能力^[4]。然而在实际生活和工作环境中存在着不同对比度的情况,高对比度的视力表并不能反映出弱视患者在不同对比度下的视觉分辨能力^[5]。为了更全面的评价视觉功能,对比敏感函数(contrast sensitivity function, CSF)的概念被引入视觉研究领域。对比敏感函数是衡量视觉系统辨认不同大小(空间频率)的物体时所需要的物体表面的最低黑白反差的物理量,它是一种新的形觉功能的定量检查方法^[6]。

2.3 拥挤效应检查

当目标单独出现而没有被其他物体靠近时,我们能更容易辨别目标的细节^[7]。这种接近物对目标可视度的干扰作用,即抑制性空间交互的形式之一,通常被称为拥挤效应。研究表明,字母识别、游标视力、方向辨别、立体视觉、人脸识别等视觉任务都会受到拥挤效应的影响。目前测量拥挤效应主要包括两个重要的参数,强度(Strength)和关键空间距离(Critical Spacing)^[8-11]。

拥挤效应的强度是指当存在侧翼干扰时对目标的辨别能力相对于目标单独呈现时减弱的程度。当目标距离侧翼一定距离之后,侧翼的存在不再影响视觉系统对目标的辨别能力,这个距离即被称为拥挤效应的关键空间距离。

3 检查方法的设计

3.1 软硬件环境

所有的实验刺激源是通过 matlab7.0 的 PsychToolBox2.5 编程实现,显示设备采用 19 寸 AOC CDT-995F 纯平 CRT 显示器,分辨率为 1600 × 1200,刷新频率为 75Hz,有效显示范围 360 × 270mm。同时,为了提高灰度级精确度,通过一个专用电路来连接 8 位显卡输出和显示器输入,使之产生 14 位的灰度级^[12]。

3.2 阈限方法设计

阈限测量是一种心理物理学的常用方法,它被定义为 50% 的实验次数能够感觉到的刺激值^[13]。本文的实验采用一种结合强迫选择法(two alternative forced choice)和阶梯法(staircase)的阈限方法进行对比度阈值的测量。实验中采用的阶梯法执行过程如图 1 所示。



图 1 阶梯法示意图

该方法的实现过程是,连续判断正确三次降低一个信号对比度阶梯,错误一次增大一个对比度阶梯,直到完成 6 个转折,取最后 4 个转折点的对比度值的几何平均值作为当前测试条件下的对比度阈值。

3.3 Gabor 视标设计

Gabor 视标是 Gabor 识别任务中的基本刺激源,Gabor 刺激源有空间频率和对比度两个变量。Gabor 变换属于加窗傅立叶变换,Gabor 函数可以在频域不

同尺度、不同方向上提取相关的特征。Gabor 变换是短时傅立叶变换中当窗函数取为高斯函数时的一种特殊情况。二维 Gabor 变换模型如下：

$$g_{uv}(x,y) = \frac{k^2}{s^2} \exp\left(-\frac{k^2(x^2+y^2)}{2s^2}\right) \cdot \left[\exp\left(ik \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}\right) - \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) \right]$$

其中 $k = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_v \cos j_u \\ k_v \sin j_u \end{pmatrix}$, $k_v = 2 \frac{v+2}{2} p$, $j_u = u \frac{p}{K}$, v 的取值决定 Gabor 滤波的波长, u 的取值决定 Gabor 核函数的方向, k 表示总的方向数, 参数 s/k 决定了高斯窗口的大小。通过调整模型的参数我们可以实现不同空间频率、对比度、方向的 Gabor 刺激源。

3.4 对比敏感度检查

对比敏感度检查是利用阈限测量方法, 分别检查患者在六种空间频率下的对比度阈值, 然后利用 GraphPad Prism 5.0 中的非线性拟合方法对实验数据进行曲线拟合, 得出不同患者的对比敏感函数曲线。测试时, 患者距屏幕 40cm, 同时要求患者在暗室中单眼完成, 弱视患者测试矫正弱视眼, 正常人测量主导眼(视力较好的眼睛), 非测试眼用不透明眼罩遮盖。

实验一步骤:

- ① 测试开始前在屏幕中心呈现一个白色注视点。
- ② 被试者按空格键后, 注视点消失, 在前后两个时间间隔随机呈现有或无 Gabor 视标的刺激, 两个时间间隔相差 800ms, 刺激呈现 142ms。
- ③ 被试者通过按键盘上的数字键 1、2 来判断 Gabor 视标呈现在第一还是第二个时间间隔, 此时再次呈现白色注视点, 被试者可以开始第 2 次测试。
- ④ 重复步骤 1、2、3, 直到测出该空间频率情况下的对比度阈值。具体流程如图 2 所示。

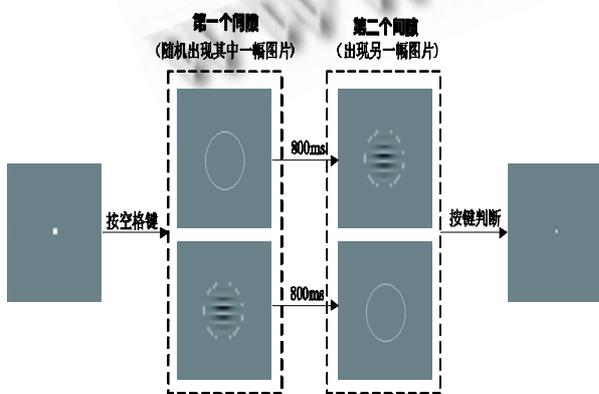


图 2 实验一操作示意图

实验过程中, 我们对不同被试在 0.5c/d、1c/d、2c/d、4c/d、8c/d、16c/d 六种空间频率情况下的对比度阈值进行测量, 然后采用高斯函数[14]对实验所测数据进行拟合, 得到对比敏感函数曲线。拟合高斯函数表达式如 3-1 所示。

$$\text{Log}(c_i) = a_1 \exp\left[-\frac{(\log_2(f) - b_1)^2}{c_1}\right] - a_2 \exp\left[-\frac{(\log_2(f) - b_2)^2}{c_2}\right] \quad (1)$$

其中 f 是 Gabor 视标的空间频率, c_i 是当前空间频率情况下测得的对比度阈值, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 是自由参数。

3.5 拥挤效应检查

拥挤效应检查是利用阈限测量方法, 分别检查患者在七种不同目标-侧翼距离情况下的对比度阈值, 然后利用 GraphPad Prism 5.0 中的非线性拟合方法对实验数据进行曲线拟合, 得出不同患者拥挤的强度和关键空间距离。测试时, 患者距屏幕 40cm, 同时要求被试在暗室中单眼完成, 弱视患者测试矫正弱视眼, 正常人测量主导眼(视力较好的眼睛), 非测试眼用不透明眼罩遮盖。

实验二步骤:

- ① 测试开始前在屏幕上方呈现一个白色注视点。
- ② 被试者按空格键后, 注视点由白色变为黑色, 800ms 后在注视点下方 10° 视角处呈现实验刺激 150ms。
- ③ 被试者通过按键盘上的左、右方向键来完成中心 Gabor 视标的方向识别任务, 此时注视点由黑色再次变为白色, 被试者可以开始第 2 次测试。
- ④ 重复步骤 1、2、3, 直到测出该目标-侧翼距离情况下的对比度阈值。具体流程如图 3 所示。

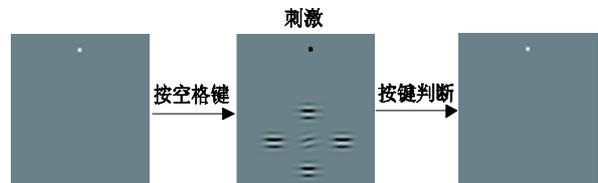


图 3 实验二操作示意图

实验过程中, 我们对不同被试在 1deg、2deg、3deg、4deg、5deg、6deg、7deg 七种不同目标-侧翼距离情况下的对比度阈值进行测量, 然后采用高斯函数[15]对实验所测数据进行拟合, 得到拥挤效应拟合曲线。拟合高斯函数表达式如 3-2 所示。

$$Th_f = Th_{unf} (1 + Peak^{1 - (\frac{FS}{CS})^2}) \quad (2)$$

其中 Th_f 表示有侧翼下的对比度阈值, Th_{unf} 表示无侧翼下的对比度阈值, $Peak$ 表示高斯函数的峰值, FS 表示侧翼 Gabor 到目标 Gabor 的距离, CS 表示拥挤的关键空间距离。实验测得的数据为 Th_f 、 FS , 待拟合的数据为 Th_{unf} 、 $Peak$ 、 CS 。

4 辅助检查方法的实现

本文设计的弱视辅助检查方法, 以 Gabor 为刺激源, 用于检查弱视患者的对比敏感度和拥挤效应。该方法的设计中, 采用三个步骤实现 Gabor 视标(假设 Gabor 视标的大小为 n , 空间频率为 sf , 对比度为 $contrast$, 偏斜角度为 $angle$):

(1) 对 Gabor 视标的大小、空间频率、对比度和偏斜角度进行初始值设置。

(2) 建立二维矩阵, 进行二维正弦变换, 得到一定空间频率、对比度和方向偏移的光栅。Matlab 实现如下:

```
[x, y]=meshgrid(linspace(-radius, radius,
n));
a=cos(angle*pi/180)*2*pi*sf;
b=sin(angle*pi/180)*2*pi*sf;
grating=sin(a*x+b*y);
```

(3) 最后对光栅进行二维高斯变换, 得到 Gabor 视标, 如图 4 所示。Matlab 实现如下:

```
%定义高斯窗函数
Gauss=exp(-((x/(radius/2)).^2)-((y/(radius/2)).^2));
%对光栅进行二维高斯变换
grating=(Gauss.*grating).*contrast;
Gabor=(grating+1)*0.5;
```

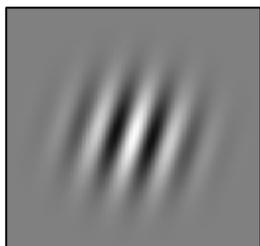


图 4 Gabor 视标示意图

5 效果分析

本文挑选 2 名被医院诊断为单眼屈光参差性的弱视患者以及 3 名矫正视力均达到 1.0 以上的正常被试参与实验。其中 2 名弱视患者基本信息如表 1 所示。

表 1 弱视患者基本信息表

被试	性别	年龄	光学矫正		矫正视力	
			弱视眼	伙伴眼	弱视眼	伙伴眼
P01	男	25	+4.00-0.75×180	-0.75	0.5	1.0
P02	男	24	+3.25-1.0×180	-2.75	0.1	1.0

对比敏感度检查中, 我们分别测量 5 名被试在 0.5c/d、1c/d、2c/d、4c/d、8c/d、16c/d 六种空间频率情况下的对比度阈值, 并利用公式(3-1)中的高斯函数对实验数据进行拟合, 结果如图 5 所示。

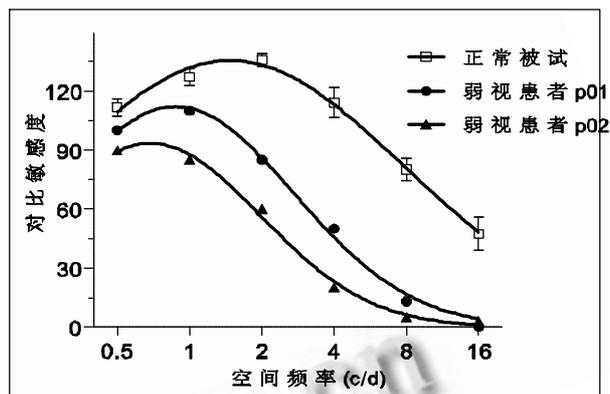


图 5 对比敏感函数曲线

从对比敏感函数曲线拟合结果可以看出, 弱视患者在高空间频率下存在对比敏感度的缺失, 与“弱视的对比敏感度均有缺陷且主要表现为高空间频率的丧失[4]”的研究事实一致。

拥挤效应检查中, 我们分别测量 5 名被试在 1deg、2deg、3deg、4deg、5deg、6deg、7deg 七种不同目标-侧翼距离情况下的对比度阈值, 并利用公式(3-2)中的高斯函数进行拟合, 被试的拥挤效应拟合曲线如图 6 所示。

拟合结果发现, 正常被试拥挤的关键空间距离均值为 3.0deg, 而两名弱视患者分别为 4.5deg 和 5.1deg, 这说明弱视患者相对于正常被试表现出更严重的拥挤, 与“拥挤效应在弱视中表现更加严重[10]”的研究事实一致。

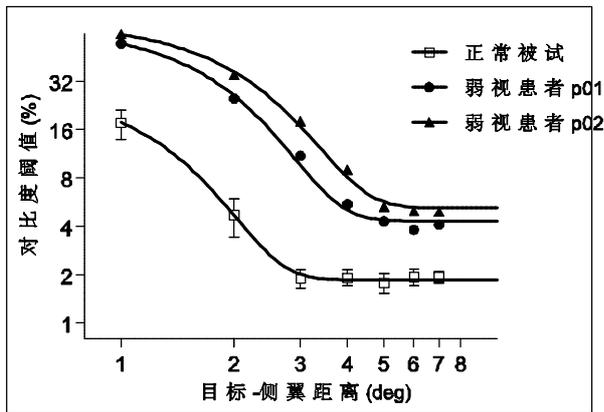


图6 拥挤效应拟合曲线

6 结束

本文在 matlab7.0 环境下设计并实现了一种基于心理物理学的弱视视功能辅助检查方法，它主要用于检查弱视患者的对比敏感度和拥挤效应功能，这对于进一步检查和诊断弱视患者的视功能缺损具有重要的意义。

参考文献

- 1 严宏.弱视.北京:科学出版社, 2007.
- 2 赵堪兴.早期发现和早期干预努力提高弱视的防治水平.中华眼科杂志, 2002,38(8):4-6.
- 3 刘凯龙,孙向军,赵志勇,王世鑫.基于心理物理学的图象评价技术研究.系统仿真学报, 2005,17,(2):417-420.
- 4 毕宏生.对比敏感度在眼科的临床应用.中华眼科杂志, 2004, 40(9):645-648.
- 5 Pelli DG, Robson JG, Wilkins AJ. The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity. Clinical Vision Sciences, 1988,2:187-199.

- 6 王丽萍.立体视觉检测及弱视治疗系统研究[博士学位论文].杭州:浙江大学, 2005.
- 7 Flom MC, Weymouth FW, Kahneman D. Visual resolution and contour interaction. J. Opt. Soc. Am, 1963,53:1026-1032.
- 8 Bouma H. Interaction effects in parafoveal letter recognition. Nature, 1970,226(5241):177-178.
- 9 Chung STL, Li RW, Levi DM. Crowding between first and second order letter stimuli in normal foveal and peripheral vision. Journal of Vision, 2007,7(2):1-13.
- 10 Levi DM. Crowding—An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. Vision Research, 2008,48(5):635-654.
- 11 Pelli DG, Palomares M, Majaj NJ. Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. Journal of Vision, 2004, 4(10):1136-1169.
- 12 Li Xiangrui, Lu Zhonglin, Xu Pengjing. Generating high gray-level resolution monochrome displays with conventional computer graphics cards and color monitors. Journal of Neuroscience Methods, 2003, 130(1):9-18.
- 13 杨治良.实验心理.杭州:浙江教育出版社, 1998.
- 14 Huang Changbing, Zhou Jiawei, Lu Zhonglin, Feng Lixia, Zhou Yifeng. Binocular combination in anisometropic amblyopia. Journal of Vision, 2009, 9(3):17,1-16.
- 15 Levi DM, Klein SA, Hariharan S. Suppressive and facilitatory spatial interactions in foveal vision: Foveal crowding is simple contrast masking. Journal of Vision, 2002,2:140-166.