文章编号:1000-5404(2013)07-0649-04

论著

基于红外视频测量技术的瞳孔反应动态识别监测系统

李 蕊[1*],张浪千[2,3*],胡 博[3],蒋 政[3],吴广延[3],姚 娟[3],刘运航[4],隋建峰[2,3] (550002 贵阳,贵州省第一人民医院康复科[1];400038 重庆,第三军医大学基础医学部:生理学教研室[2],教学实验中心[3];610000 成都,四川省成都仪器厂[4])

[摘要] **目的** 设计一种简单实用,基于红外视频测量技术,能对人或动物的瞳孔反应进行动态和同步在线自动识别和监测的系统。**方法** 系统包括:普通CCD红外摄像头、数据采集卡、生理信号记录仪及信号采集分析基础软件、瞳孔同步视频测量分析软件、计算机等。CCD摄像头接收眼球的红外光反射并将之转化为数字信号,数据采集卡采集已经数字化的视频信息然后将其输入计算机。瞳孔视频分析软件是该系统的核心,它通过动态地跟踪分析瞳孔区域的灰度值与周围区域灰度值的差异,得出瞳孔区域的总像素数从而得出瞳孔区域的面积。利用Windows内存转储机制作为桥梁,进行与信号记录系统软件间的数据通讯传递,使瞳孔大小的变化以快速跳变的数据呈现在生理信号记录仪上,同时形成实时的瞳孔反应的面积-时间曲线图。**结果** 利用本系统成功测量了猫瞳孔扩大反应。**结论** 本系统依赖简单设备解决了瞳孔自动跟踪和动态测量的难题,特别是解决了瞳孔位置移动对于测量的影响。

[关键词] 瞳孔;红外线;扩大反射;视频
[中图法分类号] R318.6; R319; R322.91 [文献标志码] A

A dynamical identification and monitoring system for pupil reaction based on infrared video measurement technology

Li Rui[1*], Zhang Langqian[2,3*], Hu Bo[3], Jiang Zheng[3], Wu Guangyan[3], Yao Juan[3], Liu Yunhang[4], Sui Jianfeng[2,3] ([1]Department of Rehabilitation, Guizhou Provincial First people's Hospital, Guiyang, Guizhou Province, 550002; [2]Department of Physiology, [3]Center of Teaching Experiments, College of Basic Medical Sciences, Third Military Medical University, Chongqing, 400038; [4]Chengdu Instrument Factory, Chengdu, Sichuan Province, 610000, China)

[**Abstract**] **Objective** To design a simple and practical system which can automatically identify and monitor the reaction of pupils of human being or animals online based on infrared video measurement technology. **Methods** The system include: ordinary CCD infrared camera, data acquisition card, physiological signal recorder and basic software for signal acquisition and analysis, synchronous measurement and analysis software of pupil video, and computer, etc. The infrared reflection from eyeball was received by CCD camera and converted to digital signals. The digital video information was acquired by the data acquisition card and then sent into the computer. The core of the system was video analysis software of pupil. By dynamically tracking and analyzing, the gray value difference between pupil and the surrounding area, the total number of pixels and the total area of the pupil were acquired. The Windows RAM transfer mechanism was used as a bridge to communicate data between the signal recording system software and the video analysis software, making the changes of pupil size as quick change digitals in the physiological signal recorder. At the same time, the time-area graph of pupil real-time response was formed. **Results** The dilation reflex was successfully measured in cats by using of this system. **Conclusion** Our system solves the challenge of pupil automatic tracking and dynamic measurement, especially the influence of pupil motion to the measurement, depending on simple devices.

[**Key words**] pupil; infrared; dilation reflex; video

Li Rui and Zhang Langqian are first author who contributed equally to the article. Corresponding author: Sui Jianfeng, E-mail: jfsui2003@yahoo.com.cn; Liu Yunhang, E-mail: liuyunhang@yahoo.com.cn

---

* 同等贡献者
[通信作者] 隋建峰, E-mail:jfsui2003@yahoo.com.cn;刘运航, E-mail:liuyunhang@yahoo.com.cn
[优先出版] http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1095.R.20130314.0930.006.html(2013-03-14)

瞳孔反应测量分析是神经科学研究潜在的理想行为模型,对于某些临床疾病(包括精神疾病、药物成瘾、心理疾患等)的诊断也具有较大的应用价值[1-5]。瞳孔反应的研究依赖于瞳孔大小的实时和准确测量,但由于瞳孔反应的影响因素多,测量技术和设备复杂,限制了其研究价值及临床应用[6-7]。目前临床上常用的一般性瞳孔检查依然主要依赖于目测,方法简单可以定性但无法用于精细的研究,专用的眼动和瞳孔测量设备又过于昂贵[8]。一些实验研究先后尝试采用了很多简易的方法,这些方法大多测量粗糙且步骤繁琐,或技术复杂且稳定性差[5-9]。例如通过光电传感器技术测量虹膜的变化虽然可以间接反映瞳孔大小,但这种测量易受虹膜颜色等因素影响,不够可靠。更难以忍受的缺点是需要以眼球固定为前提。动物实验研究中为了做到这一点,即避免眼球的自发活动,需对动物进行肌松剂麻痹外加气管插管和人工呼吸管理,这导致实验过程的复杂并易造成动物损伤。目前最先进的瞳孔测量技术是基于视频的眼动跟踪仪,它依靠配以红外发光设备的高速摄像机记录眼球位置,并跟踪分析眼动情况和瞳孔变化[1-7]。但该类设备尤其是高速摄像机的价格昂贵,普及到实验室使用有难度。因此,目前急需的是简单而能够准确、动态、自动地监测瞳孔大小变化的方法,以用于相关研究。本研究针对以上问题,设计了一种简单实用、基于红外视频跟踪测量技术、对人或动物的瞳孔反应进行动态和同步在线的识别和监测系统。

1 材料与方法

1.1 材料、设备与系统构成

以CCD摄像头、PCI数据采集卡、生理信号采集记录仪、计算机为硬件,结合生理信号采集仪基础软件和所研发的瞳孔视频分析软件,实现连续动态数字化测量瞳孔大小。整个装置中CCD摄像头接收眼球反射的红外光并将之转化为数字信号。PCI数据采集卡采集已经数字化的视频信息,将其输入计算机。瞳孔视频分析软件通过分析瞳孔区域灰度值与周围区域灰度值的差异,得出瞳孔区域的总像素数从而得出瞳孔区域的面积。利用Windows内存转储机制作为桥梁,进行两种软件间数据通讯传递(两个不同的exe进程),使瞳孔大小的变化以快速跳变的数据呈现在生理信号记录仪软件上,并形成实时的瞳孔面积-时间曲线图。见图1。

1.2 瞳孔视频图像分析软件

为动态识别测量和分析瞳孔大小,最重要的是设计一种瞳孔视频图像分析软件。设计的核心原理是,瞳孔和其周围虹膜的颜色存在差异,在捕获的数字化图像中二者的灰度值不相同,但每个像素点对应的实际面积是相同的。瞳孔部分的黑色区域,是"连续的,不可分割的,呈圆形规则分布的像素点集合。而且,该区域被白色圈状像素点集合封闭包围"。因此,只需找到并测量出这些像素点的集合,即可反映出瞳孔区域的大小。软件核心部分即利用这一原理,有效地利用瞳孔黑色区域部分和其他区域边界相隔的白色眼白的区域的差异,找到黑色区域集合。

采用vc++6.0作为软件开发工具,利用DirectShow编程技术,采集视频,通过数学建模编写算法,分辨瞳孔。

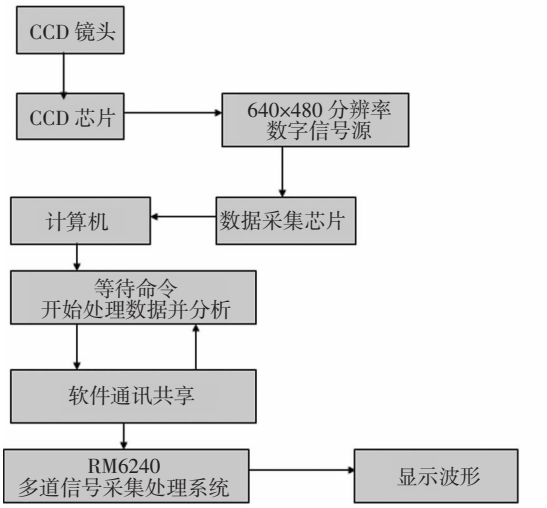


图1 瞳孔反应动态识别监测系统功能结构框图

1.3 具体操作与实施过程

1.3.1 检测图像的采集 利用当前流行的DirectShow图形图像采集技术,将通过USB显微视频头得到的数据按25帧/s(RGB24格式,分辨率640×480)采集,采集的数据进行实时录像、动态捕捉视频信号每秒25帧,即每秒25幅图像,可以计算最多25次瞳孔面积,分别保存到内存里。生理信号采集处理系统以10 ms为周期取数,即每秒可以取到100个数据点。

1.3.2 图像数据的格式化 图像数据分为两类——动态视频图像(avi文件)、静态图像文件(bmp或jpg格式)。捕捉之后得到这2类数据,取静态图像文件(bmp或jpg格式)作为分析数据。

1.3.3 图像及其三元色的数据化 数据的格式化之后,还需要将图像数据进行数据化操作。所采集的数据是640×480的BMP格式图像,将BMP图片从左下角开始,右上角结束,一共640×480个点。每个矩阵点得到的数据都是一个RGB值,RGB值是一个由R、G、B 3个数据组成,分别代表该点的红R、绿G、蓝B三元色的数值。

1.3.4 定标 即在视频区域放置1个刻度尺,划1条由N个像素组成的直线,例如,20 mm的直线由视频信号50个像素组成,1个像素我们认为是一个正方形,那么1个像素的面积即代表0.16 mm^2。定标完毕后进行阈值设定。

定标:进行瞳孔测量之前,测量系统需要校正,也就是定标。定标的目的是使摄像机测量的瞳孔面积可以真实的反应实际瞳孔大小。在摄像机视频区域放置并固定一个标准刻度尺,调整摄像机到最佳焦距状态,使刻度尺在屏幕中清晰稳定。刻度尺的刻度会在屏幕中显示出来,此时在屏幕中沿着刻度画一条直线,将刻度显示的此线长度输入相应位置(框内),此长度就真实地反映了刻度尺通过摄像系统测量后显示在屏幕上

的长度。系统即可自动定标。

识别区域的设定:手动设置眼球所在的位置及数据采集框大小,以限制数据采集和分析的量。框的大小要适中。尽可能小,以减少运算量。但考虑到瞳孔移动的原因,应预留一定的活动空间,以保证瞳孔始终处于数据采集分析框内。

瞳孔阈值的设定:瞳孔区域的灰度数值较低。瞳孔面积的识别实际上就是对图像灰度的识别。把黑(0)-灰-白(255)连续变化的灰度值量化为 256 个灰度级,灰度值的范围为 0~255,对应图像中的颜色从黑到白。屏幕中显示的图像包含了黑白之间所有的灰度色调,每个像素值都是介于黑色和白色之间的一种。测量时,在 0~255 选择 1 个数值,称为阈值(实为最高灰度值),在这个数值之下的区域的图像,测量系统就会识别为瞳孔区域。那如何识别瞳孔呢? 在瞳孔和眼睑之间有一圈眼白,其灰度值和瞳孔差别较大,被称为"真空带"(全区域中数值较高,且连续呈环状),其有效地隔开了瞳孔与周围和瞳孔灰度值差不多的部分,正是"真空带"的存在,软件就可以在真空带内识别并找到瞳孔区域(数值低的区域)。使得可以通过灰度值准确区别和测量瞳孔面积。识别真空带非常重要,阈值的设定不能影响对于真空带的识别。如果设定的阈值过高,例如超过眼白的实际灰度数值,假设是 100,很可能出现的情况是——真空带的本来数值是 100,可能被错误地识别为瞳孔。

瞳孔图像由于不同实验动物,不同光线角度,其每次的瞳孔灰度值都会有差别。黑(0)~白(255)之间的值可以通过手动设定,使瞳孔识别效果最佳。阈值太小,识别为瞳孔的区域会太小,甚至识别不了瞳孔区域(小于瞳孔区域的实际灰度值则瞳孔未被识别);阈值越大,认定为瞳孔的区域会越大,易于出现假阳性。实际在瞳孔识别过程中,识别为瞳孔的区域始终以特殊的颜色(例如绿色)标识出来,以供目测。

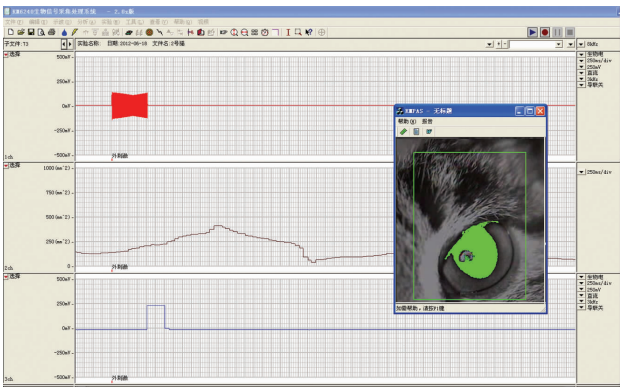
数据传输:检测程序和生理信号采集处理系统为分别 2 个独立的 exe 进程,需要进行数据交互。利用 Windows 内存转储机制作为桥梁,进行数据通讯传递。

1.4 利用该系统训练建立猫的条件性瞳孔扩大反应

为了测试系统的功能并验证系统的稳定性和可靠性,我们尝试利用该系统训练 3 只猫[雌性,3 月龄,体质量(1.0±0.1)kg]建立条件性瞳孔扩大反应。在行为训练前后,系统分别记录和储存动物对于条件刺激(CS)和非条件刺激(US)的反应,并以专用的行为分析软件进行分析比较。

2 结果

本系统的瞳孔的测量结果有两种输出方式:①将瞳孔的实际测量面积以数字快速跳变的方式显示,供实时观察;②同步画出瞳孔的面积-时间曲线图并存储相关实验数据,供实时观察和后续严格的分析测量。通过视频回放测量猫的瞳孔大小的自发变化尤其是瞳孔对于条件刺激和非条件刺激的反应情况,与系统的自动测量显示结果(面积的数字跳变及面积-时间曲线图)比较,发现该系统可以同步准确地对瞳孔变化进行实时测量(图 2)。同时,条件性瞳孔扩大反射的建立实验表明,经过一定次数的配对,猫可以建立该反射。



训练后的瞳孔反应,上中下线分别记录的是条件刺激、瞳孔反应、非条件刺激

图 2 猫瞳孔反射测量过程中实际视图

3 讨论

瞳孔反应属于内脏性反射,包括瞳孔扩大和缩小反射两种方式,根据反射的获得特征又有非条件性和条件性瞳孔反射之分。瞳孔活动观察对于某些临床疾病的诊断具有较大的应用价值[3-7]。依靠简单粗糙但可以快速定性分析的方法,例如目测,非条件性瞳孔反射例如瞳孔对光反射,已被广泛应用于临床诊断,包括神经内科、神经外科、精神科、眼科等领域的相关辅助检查。早前一段时间瞳孔观察也被用于糖尿病的辅助诊断[8]。近年来瞳孔扩大反射的测量已扩展到心理学和认知神经科学研究,但总体进展不快,其主要原因依然是瞳孔的准确和动态测量具有相当的难度[10]。

关于条件性瞳孔反射的研究,较早时期在神经科学领域曾受到一定重视,相关实验研究表明在兔、猫等动物可以成功建立条件性瞳孔扩大反射,但很难建立条件性瞳孔缩小反射[11]。动物的条件性瞳孔扩大反射只需少量配对刺激即可成功建立,这较神经科学研究领域常用的躯体性条件反射,例如眨眼条件反射、穿梭箱条件逃避性反射等的建立要快得多。另外,瞳孔反射行为本身相对简单,其执行只涉及少量神经核团(动眼神经副核等)、两类神经(动眼神经中的副交感成分,交感神经)、两种肌肉(瞳孔开大肌和括约肌)的参与,这使该反射的分析研究相对简单。因此,条件性瞳孔反射是神经科学研究的潜在的理想行为模型之一,对于丰富和完善巴甫洛夫条件反射理论具有重要意义。但长期以来以条件性瞳孔反射为模型的行为学研究报道很少[9]。这同样是因为缺少简易的、动态、自动、可靠进行瞳孔监测的设备,尤其是眼球运动的影响大大干扰了瞳孔反射的测量。

早期的瞳孔测量技术存在太多的问题,例如,照相方法只能进行离线分析而不能实现同步和动态测试、需要眼球位置固定、测试过程过于复杂、稳定性不足等[6];红外反射记录分析法也需要眼球位置固定,影响了其应

用。计算机技术的快速进步促进了视频技术在瞳孔测试分析中的应用,但一些类似系统仍存在许多问题,一是眼球跟踪效果差,眼球运动对于测试结果的影响太大,导致了测试的不稳定,二是视频图像的分析时间太长,降低了精确度。目前最先进的眼动跟踪仪解决了这些问题,但其设备昂贵,不易普及到实验室应用。

本研究目的是依赖简单的设备通过视频技术解决瞳孔的动态分析测量问题,其最核心的工作是成功研发瞳孔视频分析软件。该程序通过动态跟踪和分析瞳孔区域的灰度值与周围区域灰度值的差异,得到瞳孔区域的总像素数并计算瞳孔区域的面积,直接传输给生理信号记录系统。对于瞳孔视频分析和生理信号记录两个独立的 exe 进程,利用 Windows 内存转储机制作为桥梁进行数据通讯传递,从而使瞳孔大小的变化既可以快速的数据跳变形式显示出来,也同步呈现在生理信号记录仪软件上,形成瞳孔面积-时间曲线图,大大方便了相关的实验研究。

这种简易的基于红外视频图像分析技术的瞳孔监测系统与过去的照片分析或红外反射瞳孔测量仪相比,最明显的优势是,通过视频测量法实现了在眼动情况下对瞳孔的动态跟踪测量。在瞳孔研究的实验过程中,除非采用麻痹和人工呼吸技术,否则清醒动物的眼球活动是无法完全抑制的。对人的瞳孔测量也存在同样的眼动问题的干扰。在这种情况下,通过传统的光反射测量法进行的瞳孔测量很易受到眼动干扰从而导致误差出现。当然,通过视频分析对瞳孔的实际面积进行测量而不是只测量瞳孔的直径也是其一个优点。鉴于在某些情况下,例如光照强度增加时,瞳孔并不呈圆形,在这种情况下测量其直径(即使是测量其长径)与瞳孔的实际大小变化将出现一些误差,所以面积的测量应是更为精确的方法。

与目前最成熟的依靠红外发光设备和高速摄像机记录眼球位置的眼动跟踪仪比较,我们的设备的优点是简单实用,易于实现,尤其是其红外 CCD 价格低廉,易于普及,而依靠研发的视频分析程序,同样可满足我们对于瞳孔变化动态跟踪检测的需要。

基于红外视频图像分析法的瞳孔测量也受到相关技术瓶颈的限制,尤其是图像信息处理速度方面的限制。如果要实现对视频的同步和动态分析,必须快速对图像信息加以处理分析和传输,这对软件和硬件水平和技术要求均较高,这也正是相关设备和技术之所以复杂的原因。但随着计算机硬件和编程技术的进步,数据量大和运算速度的问题已经可以解决。本简易系统的视频信号为每秒 25 帧,意味着每 40 毫秒有 1 幅图像,每秒最多需完成 25 次瞳孔面积的计算。单幅图像有 40 ms 的处理和传输时间对于现在的计算机来说已经足够。而在时间测量上,40 ms 的忽略水平与瞳孔反应变化的实际间期及潜伏期长度相比,是可以接受的,但是,未来希望能够进一步降低这一水平,以提高测量精度。需要注意的是,生理信号采集处理系统需要以适当的采样周期采样,以保证可以取到全部的每秒 25 个数据点。

研究表明,被广泛地应用于学习记忆机制研究的恐惧性条件反射的过程中常伴随瞳孔扩大条件反射的发生,因此,在恐惧条件反射的研究(常以动物全身的 freezing 为指标)中观察瞳孔的变化有可能使恐惧行为的判断更加精确、更易量化。利用本系统进行的猫的条件性瞳孔扩大反应的成功建立和测量表明,本系统是一种理想而简易的瞳孔反应动态识别系统,适用于人或动物的瞳孔条件反射及认知和心理、学习记忆行为学相关研究。瞳孔反应动态识别监测系统的建立有望有力推动相关领域,尤其是神经科学研究和临床相关疾病诊断的进步[1-6,8,12]。

参考文献:

[1] Aboyoun D C, Dabbs J N. The Hess pupil dilation findings: sex or novelty? [J]. Soc Behav Pers, 1998, 26(4): 415-419.

[2] Aston-Jones G, Cohen J D. An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: adaptive gain and optimal performance[J]. Annu Rev Neurosci, 2005, 28: 403-450.

[3] Bailey B P, Busbey C W, Iqbal S T. TAPRAV: An interactive analysis tool for exploring workload aligned to models of task execution[J]. Interacting with Computers, 2007, 19(3): 314-329.

[4] Bailey B P, Iqbal S T. Understanding changes in mental workload during execution of goal-directed tasks and its application for interruption management[J]. ACM Trans Comput-Hum Interact, 2008, 14(4): 21.

[5] Bradley M T, Janisse M P. Pupil Size and Lie Detection - the Effect of Certainty on Detection[J]. Psychology, 1979, 16(4): 33-39.

[6] Bradley M T, Janisse M P. Accuracy demonstrations, threat, and the detection of deception: cardiovascular, electrodermal, and pupillary measures[J]. Psychophysiology, 1981, 18(3): 307-315.

[7] Costa-Gomes M, Crawford V, Broseta B. Cognition and behavior in normal-form games: an experimental study[J]. Econometrica, 2001, 69(5): 1193-1235.

[8] Sanchez-Pages S, Vorsatz M. An Experimental study of truth-telling in a sender-receiver game[J]. Games and Economic Behavior, 2007, 61(1): 86-112.

[9] Shimojo S, Simion C, Shimojo E, *et al*. Gaze bias both reflects and influences preferences[J]. Nat Neurosci, 2003, 6(12): 1317-1322.

[10] Siegle G J, Steinhauer S R, Stenger V A, *et al*. Use of concurrent pupil dilation assessment to inform interpretation and analysis of fMRI data[J]. Neuroimage, 2003, 20(1): 114-124.

[11] Spence S A, Farrow T F, Herford A E, *et al*. Behavioural and functional anatomical correlates of deception in humans[J]. Neuroreport, 2001, 12(13): 2849-2853.

[12] Laeng B, Orbo M, Holmlund T, *et al*. Pupillary Stroop effects[J]. Cogn Process, 2011, 12(1): 13-21.

(**收稿**:2012-11-01;**修回**:2013-02-01)

(编辑 王小寒)