

文章编号: 1000-6893(2001) 05-0385-05

眼动测量系统及其在工效学中的应用

刘 伟, 袁修干, 庄达民, 柳忠起

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系, 北京 100083)

EYE-MOVEMENT MEASURE SYSTEM AND APPLICATION IN ERGONOMICS

LIU Wei, YUAN Xiu-gan, ZHUANG Da-min, LIU Zhong-qi
(Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University
of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 首先回顾了眼动测量系统的研究发展历程; 其次通过对眼动的基本形式、特点的分析, 以及双眼运动的规律研究, 对眼动测量方法的具体优缺点进行了对比, 并重点对红外电视法眼动测量系统(Infrared TV EMMS) 及其组成部分的基本原理进行了探讨; 最后对眼动测量系统在工效学方面的应用前景进行了分析。

关键词: 眼动; 测量; 工效学

中图分类号: TB18; TM 93; TP39 文献标识码: A

Abstract: This paper looks back the study history of eye-movement measure systems. Secondly, through analysis of basic formats and characters of eye-movement, and research on the rule of two eyes-movement, the virtues and shortcomings of various methods are contrasted, with the emphasis on the infrared TV eye-movement system. At last, an application analysis of eye-movement measure systems in the ergonomics is given, which will play an important role in the future real-time measures and synthetic estimations of eye-movement measure systems in human-machine interaction.

Key words: eye-movement; measure; ergonomics

现代人机系统, 特别是航空航天驾驶中, 作业人员是在特定环境中操作和管理复杂系统和机械设备。当人在这种环境中工作时, 既要靠眼睛来观察环境, 又要靠细致的注视来完成精确的控制动作; 分析眼睛的运动就可知人在操作时如何分配注意力, 同时了解仪表、屏幕以及外视景如何设计和合理分配才能获得最好的人机交互, 既减轻操作人员的工作负担又避免出错, 切实提高人机工效。这对于军事、驾驶、宇航领域以及日常驾驶的仪表配置都有实际意义^[1]。

1 视觉与眼动系统的研究发展

作为探求人类如何从视觉获取信息的一种手段, 对人眼的研究源于 19 世纪 90 年代, 但视觉测量的研究开始得比较晚。最初是通过测试者的询问来确定眼睛注视点(主观感知法)。随后, E. B. Delabarre 和 E. B. Huey 仿效记纹鼓记录肌肉运动的方法, 采用机械记录发明了记录眼睛注

视点的方法, 后来, R. Dodge 利用光记纹鼓和角膜反射原理, 摄影记录眼睛注视点的运动。这种方法的可利用性使得它得到了很大的发展。1931 年, M. A. Tinker 用光记纹鼓摄取双眼运动的图像, 并可同时记录横向、纵向运动的图像, 利用角膜反射光点的位置变化可估算眼睛的位置^[2]。

近年来, 随着计算机及人机界面技术的发展, 眼动仪在人机界面设计上受到高度重视。美国空军最早在新的人机交互设计中运用视觉追踪技术, 最初的主要目的是要把视觉追踪用于战斗机座舱的设计。这一领域的深入研究表明, 视觉追踪技术不但可以用于战斗机座舱的设计, 而且还可以运用视觉追踪技术, 把人眼作为计算机的一种输入工具, 形成视觉输入人机界面。另外, 日本的 ATR 通讯系统研究实验室和东京工业大学已将眼动测量用于对虚拟现实的研究, 有效地解决了大的视场和高精度的图象显示之间的矛盾。随着高性能摄像机的出现和图象处理技术的发展, 眼动仪将朝着高精度、高实用性和低成本的方向发展^[3,4]。

国内对视觉测量的研究始于 70 年代末、80 年代初。一般都是引进国外设备作实验研究, 西安

收稿日期: 2000-09-18; 修订日期: 2000-11-01

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(1999000619); 北京航空航天大学“211 工程”专项基金资助项目(59099)

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2001/05/0385/>

电子科技大学在自主开发研制眼动仪样机方面做了很多工作。北京航空航天大学人机环境工程研究所90年代末开展了飞机座舱人机界面评价实验台的研制,利用视觉与眼动系统分析控制面仪表盘布局是研究内容之一。

2 视觉与眼动系统的一般概念

眼动可在视觉与眼动系统中受一定刺激下发生而其信息被记录。刺激的方式不同,其诱发的眼动信号形式也不同,参与眼动系统的神经通路、生理解剖构成以及发生眼动的机制均不同。一般把视觉与眼动系统分为以下反射性和主动性两类。

2.1 反射性眼动系统

反射性眼动系统也被称为前庭眼动系统,是通过刺激前庭系统诱发眼动的。由于从刺激信号(输入)到眼动(输出)不受大脑(意识)的控制,通常属于反射性动作,因而又被称为前庭-视反射系统。其眼动信号是典型的三角波,常称为眼震电图(ENG),如图1所示。

一般而言,眼电信号波形参数的变化与神经系统异变有相关性,例如在ENG中,AB段叫做慢相,BA段叫做快相,慢相和快相的斜率在许多异变中表现出不同性。

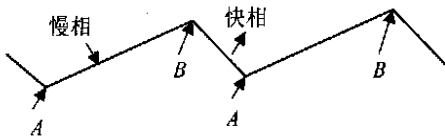


图1 眼震电图

Fig. 1 Eye-shock node electrical graph

2.2 主动性眼动系统

主动性眼动系统也称为眼球运动系统,除前庭眼动系统外,其它的刺激信号都须通过皮层中枢的作用,下行到脑干眼动核才能启动眼球运动。其间的意识作用是不可避免的,故称为主动性眼动系统。根据具体情况主动性眼动系统又可分为注视运动、眼球跳动、眼球平滑跟踪运动等3类^[5, 6]。

(1) 注视运动(Fixation) 正常的视觉观察过程中,眼动表现为在被观察目标上一系列的停留以及停留点之间的飞速跳动。这些停留一般至少在100ms以上则被称为注视。绝大多数的信息只有在注视时才能获得加工。

跳动称为眼跳动。这是使眼球注视方位突然变化的随意运动,在目标图象中含有位置信息时,就可以作为刺激引起眼球的跳动。

(3) 眼球平滑跟踪运动(Smooth Pursuit) 由运动目标的速度信息输入到中枢神经系统过程中,眼睛为了追随这个目标而引起的一种连续反馈的伺服运动。视觉系统对目标速度的检测与反馈控制,在整个平滑跟随过程中都是不断在进行的。

需要注意的是,人的视觉器官在对物体(静止或运动的)进行观察时,总是同时进行多种形式的眼动。通过3种不同形式的运动,眼睛才能完成对对象的瞄准和连续动态观察,从而保证清晰的视觉输入。

人的两个眼球并不象其他功能相同的两个器官如肾脏和手,原因在于左右两眼的两个视网膜神经以半交叉结构通向左右半球大脑,这种结构有利于检测双眼视差,从而产生立体视觉。由此,双眼的运动也就有许多的约束条件,不象双手一样可以分别独立运动。视觉中枢总有单一视觉的倾向,一旦给双眼以视差刺激时,中枢就会控制双眼作对称的会聚运动,把双眼感觉到的重象融合成单一象。海林(Hallin)定律认为双眼的运动只能是同方向同幅度的运动,或者是对称的会聚或反相的会聚运动,而没有其他形式。实验结果也证明双眼运动的规律均符合海林定律^[7],这充分说明了双眼是单个器官的两个部分,中枢神经总是发出一对信号同时控制左右两只眼,因而双眼只能是共轭或对称运动。虽然双眼运动具有所述的相关性,但这并未改变双眼各有其独立的自由度,测量双眼的运动仍是极其必要的,因为只有通过双眼注视点的获取才能真实地反映人眼的运动,为研究人的双眼在信息获取及处理时的数据融合机制打下基础。

3 红外电视眼动测量系统

眼动测量方法,经历过早期的直接观察法、主观感知法,以及后来发展起来的脑电图法、眼电图法或EOG法、接触镜法、电磁线圈法、角膜反射法、红外光电反射法、红外电视法等,其具体的优缺点如下^[8~10]:

(1) 脑电图法 脑电图法利用眼动和脑电波变化之间的联系,从脑电波的变化间接地分析眼动,缺点是无法精确建立眼动和脑电波之间的联系。

(2) 眼电图法或 EOG 法 (Electro-Oculograph) 眼球在正常情况下由于视网膜代谢水平较高, 因此眼球后部的视网膜与前部的角膜之间存在着一个数十毫伏的静止电压, 角膜区为正, 视网膜为负。当眼球转动时, 眼球周围的电势也随之发生变化; 将两对氯化银皮肤表面电极分别置于眼睛左右、上下两侧时, 就能引出眼球变化方向的微弱电信号, 经放大后可得到眼球运动的位置信息。该方法优点是价格低廉, 带宽高; 缺点是误差大, 有伪迹信号, 且对人干扰大。

(3) 接触镜法 (Contact Lens) 基本原理是将一块反射镜固定在角膜或巩膜上, 眼球运动时将固定光束反射到不同方向, 从而获得眼动信号。该方法是简单易行, 精度高, 缺点是不符合人的视觉习惯, 使眼球感到不舒服, 对人干扰大。

(4) 电磁线圈法 (Electromagnetic Coil) 受试者头部用电子方法产生水平及垂直方向两种不同频率的交变磁场, 把一个很细的线圈用接触镜固定在角膜边缘, 则线圈在跟随眼睛运动时, 根据其输出信号和相位便精确地测出眼睛的水平 and 垂直运动。该方法的优点是精度高, 缺点是接触眼球引起受试者不适。

(5) 角膜反射法 (Corneal Reflection) 利用角膜表面形成的虚像因眼球旋转的移动, 实时检测出图象的位置, 经信号处理可得到眼动信号, 但易受眼动中慢飘移分量的影响。

(6) 红外光电反射法 (Infrared Photoelectric) 用看不见的红外光照射眼部, 在眼部附近安装两只红外光敏管, 使虹膜与巩膜的边缘处的左右两部分反射的红外光分别为这两只光敏管所接收。当眼球向右运动时, 虹膜转向右边, 右边的光敏管所接收的红外线就会减少; 而左边的巩膜反射部分增加, 导致左边的光敏管所接收的红外线就会增加。利用这个差分信号就能无接触地测出眼动。其缺点是误差大, 垂直精度低。

(7) 红外电视法 (Infrared TV) 在红外线照射下, 利用眼睛各部分对红外光反射特性各异的特点, 用对红外敏感的电视摄像管的像转换成视频电视信号, 经过信号处理就能得到垂直和水平方向的二维眼球位置信号。将此信号输入计算机, 就可以对眼球位置信号进行视场叠加和处理。该法具有操作简便, 对人无干扰, 可移动等优点, 是目前较为理想的一种眼动测量方法。

利用红外电视法原理的眼动测量系统 (Eye Movement Measuring System, 简称 EMMS)。其

基本原理是利用各种高速光电转换器件和不断成熟的图象处理技术, 检测并提取出眼睛的位置信息, 从而记录视觉运动过程, 为研究视觉追踪的生理特征, 双眼的信息获取、数据融合等机制提供科学依据, 同时也为信息显示/控制的人机工效研究提供实验手段。

红外电视法 EMMS 系统的原理如图 2 所示, 其结构可分为: (1) 光学成像部分; (2) 模拟信号处理及 A/D 转换部分; (3) 瞳孔中心数字化检测及数据发送部分; (4) 计算机处理部分。其中 (1) ~ (3) 可归为系统硬件, (4) 的计算机处理包括标定及视场匹配环节, 主要用相关软件来完成。整个系统的测量原理为: 利用光学系统中的图像传感器获得眼睛运动的瞬时图像, 然后交由图像处理系统, 经滤波、放大、以及 A/D 转换产生含有瞳孔位置信息的数字信号。由数字检测系统负责瞳孔中心坐标检测及数据转换, 并以异步串行通信方式和计算机进行通讯, 将瞳孔中心坐标数据传输给计算机完成标定等工作。计算机对于背景视场摄像机传输来的图象和标定后的瞳孔中心坐标进行叠加及数据后处理。

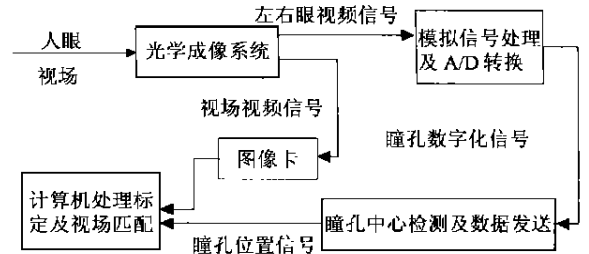


图 2 眼动仪工作框图

Fig. 2 Eyemovement instrument working flow chart

图中的光学成像系统, 是利用眼球各部分在红外光照射下对红光反射特性不同的特点, 用红外光传感摄录系统获得眼的视频电视信号, 然后由图 2 中的相应部分得到瞳孔的位置信号。为了不干扰人眼观察目标, 系统采用 920nm 的红外光照射眼睛, 视网膜对红外线是不敏感的, 而眼动仪的红外光传感测量系统对 920nm 的红外线仍有较好的响应, 以此来获得满意的测量结果。

4 眼动测量系统的应用举例

图 3 为测试人的视觉注意力分配情况^[5], 通过测试要达到的目的为: (1) 明确信息来源, 也即了解人正在看什么; (2) 了解信息接受的顺序; (3) 在所接受的信息中, 最关心的信息是什么; (4) 对所接受信息的关心程度 (用注视时间和次

数来表示); (5) 从接受一个信息转化到另一个信息的切换速度。

图 3(a) 为眼注视点的轨迹曲线; 图 3(b) 为在视野图上叠加眼注视点的轨迹曲线; 图 3(c) 为在代表性的固定点上显示眼注视的情况及眼注视的轨迹曲线; 图 3(d) 为眼的注视点及轨迹曲线叠加到视野图上; 图 3(e) 为用三维柱体来表示固定点的密度分布, 三维柱体越高, 固定点的数量就越大; 图 3(f) 为用三维柱体来表示眼注视点的持续时间, 三维柱体越高, 眼注视点的持续时间越长; 图 3(g) 为用圆坐标来表示眼注视点的矢量运动分布情况。外圆代表频数的百分数; 图 3(h) 为用直方图来表示眼注视点的运动速度分布情况。

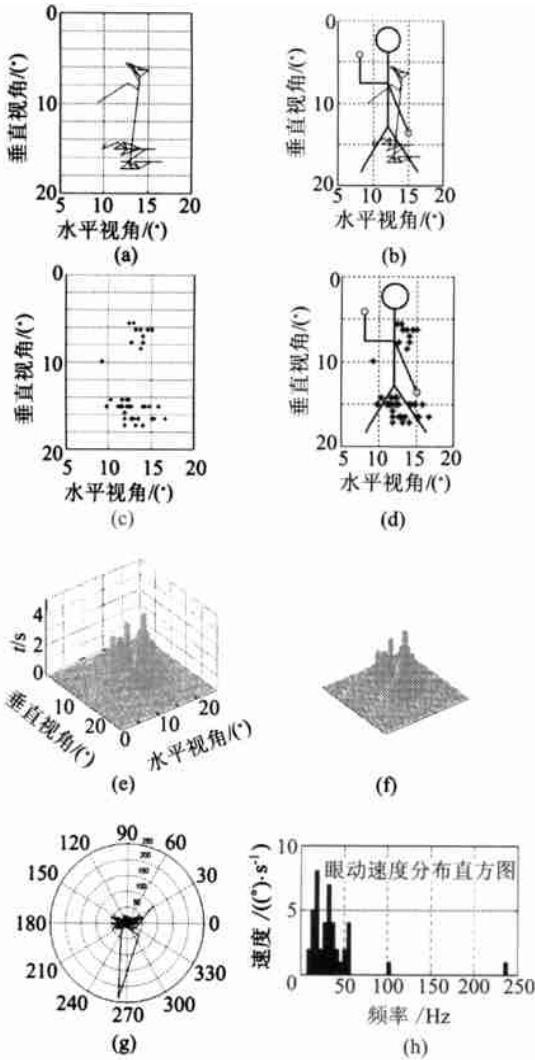


图 3 眼动仪测定应用举例

Fig. 3 Application instance of eyemovement instrument measuring

通过上述的测试, 就能对作业人员观察仪表的路径和工效进行分析, 从而达到合理布局各种仪表, 达到息搜索路径最短, 时间最快的目标。

5 结束语

本世纪 60 年代以来, 随着红外技术和微电子技术的飞速发展, 才出现了一些比较实用的系统, 而且呈迅猛发展的态势。美国和日本在这方面的研究居世界前列, 而且已进入实用化和商业化阶段。美国在 1988 年末向市场推出的商用 Erica 系统 (The Eye-gaze-response interface computer aid), 是一种基于红外电视和图象处理方法的应用系统。它处理速度快, 直接由眼睛来控制输入, 用于帮助具有视觉功能的重度残疾人进行控制、通信、娱乐等, 深受广大残疾人的欢迎。佳能照相机的新机型 (EOS2E) 增加了一种眼控对焦的新功能, 可以在一幅画面中根据人的注视位置进行聚焦, 而这种功能正是在照相机上加了一维眼动测量装置来实现的。由此可见, 眼动测量的研究及应用已深入到日常生活领域中^[11, 12]。

随着科技的不断发展和社会的不断进步, 人在特定环境中既要靠眼睛来观察环境, 又要靠细致的注视来操作和管理复杂系统和机械设备成为一种现实的必要; 通过对视觉-眼动系统的研究, 可以得知人在观测各种外景和屏幕信息时的扫视选择和注视过程, 从而可以研究人的视觉感知和综合的机理; 并且在多批量、多目标、多任务情况下, 对于不同位置、大小、颜色、速度的目标的眼动敏感度、延迟、反映速度等具体特性有深入细致的了解, 而且人的疲劳也容易从眼动规律中反映出来。这对于军事、驾驶、宇航领域以及日常驾驶的仪表配置都有实际意义。

参 考 文 献

- [1] 陈信, 袁修干. 人-机-环境系统工程总论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- [2] Sheridan T B, Ferrell W R. Man-Machine system[M]. Cambridge: The MIT Press, 1981.
- [3] Brandt H F. Ocular patterns and their psychological implications[M]. The Ame Press, 1940.
- [4] Yamamoto S, Kuto Y. A method of evaluating VDT screen layout by eye movement analysis[J]. Ergonomics, 1992, 35 (5/6): 591- 606.
- [5] Saito S. Does fatigue exist in a quantitative measurement of eye movement[J]. Ergonomics, 1992, 35(5/6): 607- 615.
- [6] Beggs W, Howaveh C. Movement control in man in a repetitive motor task[J]. Nature, 1970, 391: 756.
- [7] Bruno P, van den Berg A V. Relative orientation of primary position of the two eyes[J]. Vision Res, 1997, 37: 935

- [8] Haslwanter T. Mathematics of 3-dimensional eye rotations [J]. *Vision Res*, 1995, 35: 1727- 1739.
- [9] Twed D. Visual-motor optimization in binocular control [J]. *Vision Res*, 1997, 37: 1939- 1951.
- [10] Erkelens C J, van Ee R. Capture of visual direction: an unexpected phenomenon in binocular vision[J]. *Vision Res*, 1997, 37: 1193- 1196.
- [11] Brandt S, Stark L. Spontaneous eye movement during visual imagery reflecting the content of the visual scene[J]. *Cognitive Neuroscience*, 1997, 9: 27- 38.
- [12] Dehamel J, Colby C, Goldberg M E. The updating of the representation of visual space in parietal cortex by intended eye movements[J]. *Science*, 1992, 27: 227- 240.

作者简介:



刘 伟(1970-) 男, 山东省枣庄市人, 1991年毕业于山东科技大学综合工程机电专业, 1999年中国矿业大学北京研究生部安全技术工程硕士毕业, 同年考入北京航空航天大学, 现为人与环境专业博士研究生。至今发表论文十余篇。



袁修干(1934-) 男, 浙江省嵊县人, 工学博士(RWTH Aachen), 北京航空航天大学教授、博士生导师、人与环境工程学科博士点创建者。北航人机环境系统工程/空调制冷技术研究所所长。兼任全军总装备部武器装备人机环境系统工程标准化技术委员会副主任、全军总装备部武器装备人机环境

系统工程专家组顾问、中国航空学会理事、中国航空学会人体工程/航医/救生专业分会主任、中国系统工程学会人机环境系统工程专业委员会副主任。研究领域为: 航空航天环境控制及生命保障系统、人机环境系统计算机仿真、空调制冷技术等。至今发表论文 120 多篇, 出版专著 8 部。曾获科技进步奖国家级一项、省部级 16 项, 国家专利二项。享受国家政府特殊津贴。



庄达民(1950-) 男, 上海人, 工学博士, 北京航空航天大学教授, 主要研究方向: 人机界面工效、有限空间气流流动、热环境工程、空调的冷却技术, 曾获省部级科技进步奖 2 项。

(责任编辑: 吴小勇)