

视线交互中两类扫视运动的人机工效评估研究

张新勇¹ 查红彬²

(中国人民大学信息学院 北京 100872)¹ (北京大学信息科学技术学院 北京 100871)²

摘要 Fitts 法则是人机交互领域预测人机工效的一个有效模型,在许多交互方式中都得到了验证,是传统人机工效研究的理论基础。然而在视线交互中,由于眼动肌肉神经控制机制与肢体运动不同,Fitts 法则并不适用。近两年的相关研究提出了一个新的专门针对视线点击任务的难度指数 ID_{eye} ,它比经典的 Fitts 指数更能准确预测视线交互的工效。然而,在新模型的有效性验证实验中并没有考虑两种典型的扫视运动(向心和离心运动)的差异。为此,在前期研究的基础上设计组织实验,验证了视线交互中离心和向心这两种眼球运动所带来的人机工效和稳定性的差异,并证实新的 ID_{eye} 模型仍然能有效预测单纯的离心或向心扫视条件下的人机工效,是对视线交互工效研究的重要补充。

关键词 视线交互, Fitts 法则, 人机工效, 向心扫视眼动, 离心扫视眼动

中图分类号 TP11 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.10.001

Evaluation of Effects of Centripetal and Centrifugal Saccades on Human Performance in Gaze-based Interactions

ZHANG Xin-yong¹ ZHA Hong-bin²

(School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)¹

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)²

Abstract Fitts' law is an effective model to predict human performance in the field of human-computer interaction (HCI). Its effectiveness has been confirmed in many situations, and it is the theoretical basis to study the human performance in HCI. However, due to the different muscle controlling mechanisms of eyes and limbs, Fitts' law cannot be applied to the pointing task in gaze-based interactions. Recently, Zhang etc proposed a new index of difficulty (ID_{eye}) that can effectively model the human performance in dwell-based eye pointing. However, their model dose not specifically take account of the differences of the two kinds of saccades (i. e. centripetal and centrifugal saccades) involved in eye pointing. This paper aimed to investigate the different performance under the different conditions of the two typical saccadic eye movements: saccades toward the primary position (centripetal) and away from the primary position (centrifugal). Carrying out an experiment, we confirmed that there is significant difference in moving time between these two eye movements, and that the ID_{eye} model can still accurately model the performance even in the situation of pure centripetal or centrifugal saccades. This work is necessary to complete the study of modeling dwell-based eye pointing, and it further confirms the suitability and effectiveness of the ID_{eye} model for gaze-based interactions.

Keywords Gaze-based interaction, Fitts' law, Human performance, Centripetal saccade, Centrifugal saccade

1 引言

早在 20 世纪 80 年代初, HCI 领域就开始了视线交互的研究和探索^[1],然而受眼动跟踪设备性能的限制,这种方式离日常使用还有一定距离。随着视线跟踪技术的日益进步,眼动跟踪设备的精度和稳定性日益提高,交互的可用性也日益改善。特别是近期,瑞典 Tobii 公司已开始在市场上投放面向终端消费者的视线输入设备。基于视线的交互方式不但能给特殊用户群体的生活带来诸多便利,也将在普通用户群体中越来越普及。

进入新世纪前后,学术界对于视线交互越来越重视,欧美

均有专门的学术会议,如每两年一次的 ACM ETRA 会议已召开 7 届^[2]。经过几十年的研究探索,视线交互方式可应用于文字录入、信息安全、移动计算、阅读辅助、多通道系统等多种不同的场合,但对于视线交互的人机工效问题的研究一直比较匮乏,直到近期我们才提出了一个新的模型^[3]。我们依据眼球神经控制系统的特点以及主要眼动类型(扫视和凝视)的生理特征建立交互任务难度指数。此后,我们对新的视线交互工效模型做了进一步的扩展^[4],但并没有进一步验证模型在两种不同视线扫视即离心和向心扫视条件下的有效性。神经生理学领域的专家早就注意到这两种扫视类型的差异^[5],然而它们在视线交互中对工效的影响仍然是个未知数。

到稿日期:2013-07-03 返修日期:2013-10-11 本文受国家自然科学基金面上项目(61070144)资助。

张新勇(1974—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为智能人机交互、信息系统人因工程、新型用户界面, E-mail: x.y.zhang@ruc.edu.cn;

查红彬(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机视觉、虚拟现实、智能机器人系统等。

鉴于此,本文将在相关研究的基础上设计新的实验来做进一步的探索。

2 相关工作

回顾 HCI 领域有关人机工效的研究可以发现,涉及肢体参与的交互任务工效模型要么是对原始 Fitts 法则进行修正扩展而来,如 2D 或 3D 目标点击任务;要么是以它为理论基础推导出新的模型,如 Steering Law。然而,对于视线交互来说,它并没有肢体的参与,所以它的神经信号处理过程自然就与传统交互的处理过程不一致。因此,Fitts 法则的适用性就大打折扣。虽然之前有将 Fitts 法则应用于视线交互的研究^[6-8],但结果并不理想。在文献[3]中,我们首次针对视线交互点击任务提出了一个新的工效模型。该模型中的难度指数 ID_{eye} 可以从两个不同的角度进行阐述:一是像 Fitts 法则那样,从香农信息理论的角度进行解释^[9],二是用 Meyer 等人提出的最优运动控制模型理论进行解释^[10]。

2.1 从信息传输理论角度解释

在 HCI 领域被广泛应用的 Fitts 法则实际上是依照香农信息传输理论类比而来的,Mackenzie 最先将如下形式的 Fitts 模型应用于人机交互中的工效建模^[11]:

$$MT = a + b \times ID = a + b \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) \quad (1)$$

其中, a, b 为回归系数, ID 为任务难度指数。式(1)作为人机交互领域中的一个理论工具受到了持续且深入的研究。我们知道,一个通信系统通常包括 5 个部分:信息源、发射器、传输通道、接收器和目的地。发射器将信息源的信息编码成信号,然后接收器反过来将从通道传输过来的信号还原成信息。在这个过程中,信号很容易受到噪音干扰。在这种情况下,接收器的首要任务是在一系列可能的备选信号中选择出正确的信号。香农第 17 定理将信号传输通道的容量 C 定义为^[12]:

$$C = B \log_2 \left(\frac{S}{N} + 1 \right) \quad (2)$$

其中, B 代表通道带宽, S 和 N 分别代表发射器的平均信号传输能力和平均噪音。可以看出,难度指数 ID 的定义和通道容量 C 的定义在形式上非常相似。

文献[3]认为式(2)中的对数函数可以视作信号发射器到接收器的编码解码过程的“算子”。由于与眼动点击有关的神经信号只在神经网络中传输,它们在这个“伪传输系统”中可同时被当作发射器和接收器。因此,其相应的编解码可视为非必要的。另外,文献[3]用了“信号增强”的概念来解释眼动扫视的快速效果。这样,在眼动神经信号传输系统中,其传输通道的容量 C' 可定义为如下形式:

$$C' = B \left(\frac{S + S_0 + N}{N} \right) \quad (3)$$

式(3)与相应的香农公式相比少了关于 C 的对数关系,但多了一个常量,用于描述信号增强的效果。运用类似 Fitts 难度指数 ID 和传统通道容量 C 定义的类比方法,文献[3]根据 C' 定义了视线点击任务的难度指数 ID_{eye} :

$$ID_{eye} = \frac{A + A_0 + W}{W} \quad (4)$$

其中, A_0 是类比于 S_0 的距离常数, A 远小于 A_0 ,由于很多实验结果都证实 A 对眼动时间的贡献率很小,因此 ID_{eye} 被简化为如下形式:

$$ID_{eye} = \frac{A + A_0 + W}{W} \rightarrow ID_{eye} = \frac{e^{\lambda A}}{W} \quad (5)$$

其中, λ 作为经验常数替代了 $1/A_0$ 。由于眼睛生理震颤造成眼控光标的不稳定性,在上式的分母中引入另一个经验常数 μ 来反映这种不稳定性所带来的负面影响,即如果目标大小和阈值 μ 相近,就不可能完成交互任务。 ID_{eye} 的形式变为:

$$ID_{eye} = \frac{e^{\lambda A}}{W - \mu} \quad (6)$$

文献[3]中的验证实验结果显示, ID_{eye} 的精确度在不同的停留时间和不同的眼动测控方法中都比较稳定($R^2 = 0.95$),并且两个经验常数 λ 和 μ 都基本保持稳定。

2.2 从最优运动控制模型理论角度解释

尽管从信息理论的角度解释关于运动工效的观点仍然被人机交互领域的专家所认可,但在心理学领域却有着不同的观点^[13]。最有影响力的一个理论是 Meyer 等人提出的“随机优化运动模型”^[10]。该模型认为在一个频繁的目标定位运动中,总是先有一个子运动触发,在目标中心停止;如果没有瞄准,随后会有另一个矫正的子运动。基于这个运动模型,运动时间可以用如下公式描述:

$$T = a + b \sqrt{A/W} \quad (7)$$

Meyer 在随后的工作中考虑到了若干个子运动可能发生的情形,将上述公式修改为:

$$T = a + b(A/W)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

其中, n 表示子运动的个数。Harris 和 Wolpert 在 2006 年提出,扫视轨迹中存在一个最佳的速度和精确度制衡关系^[14]。他们认为,最佳的控制机制可以消除眼动的位置错误,这样,眼睛通常只需要一次扫动就可以运动到目标中心。因此,我们在验证上式时将 n 的值设置为 1。结果表明,这可以正确表示 W 因素对工效的影响,但是不能有效表达出 A 的影响。考虑到眼睛扫视和凝视的特征,我们为上述增加了两个经验常数来平衡 W 和 A 对时间(工效)的影响:

$$T = a + b \frac{A + A_0'}{W - \mu} \quad (9)$$

如果 A 远小于 A_0' ,上式就与基于 ID_{eye} (式(5))的工效模型等价。对实验结果的回归分析也支持这一论点。这就意味着随机优化运动模型也可以用来预测眼睛运动。此后,我们进一步将 ID_{eye} 的定义从特定的圆形目标扩展到更具一般化的矩形目标^[4]。实验验证结果表明,如下形式的定义能准确描述 2D 矩形目标条件下的视线点击任务工效:

$$ID_{eye} = e^{\lambda A} \sqrt{\frac{\omega}{(W - \mu)^2} + \frac{1 - \omega}{(H - \mu)^2}} \quad (10)$$

其中, ω 是表示矩形目标的宽度和高度(W, H)不同作用的权重系数。

3 研究问题的提出

3.1 扫视运动的细分

眼球的扫视运动可以进一步细分为离心(Centrifugal)运动和向心(Centripetal)运动。这两种运动的不同与眼动的幅度、位置的可预测性及运动的起始位置有关。在本文中,所谓离心运动是指眼球从其基准位置(Primary Position,又称第一眼位)向眼窝边缘转动;反之,从眼窝边缘回到基准位置则是向心运动。眼睛基准位置(简称基准眼位)通常是眼球可运动范围的中心位置。如端坐电脑屏幕中心正前方,眼睛平视屏

幕时的眼球位置即可视为基准眼位。不同个体的基准眼位会略微有所不同。已有神经生理学方面的研究发现,向心的扫视运动即回到中心点的扫视运动比相应条件下的离心运动所耗的时间少。换句话说,向心运动要比离心运动快^[5,15]。

3.2 问题的提出

如前所述,我们提出了一个新的视线交互工效模型。然而,在我们的前期工作中并没有讨论以上细分的两种扫视类型的差别。神经生理学领域一系列早期和近期的研究工作都证实了离心和向心眼动显著的时间差异性^[15]。然而,其在视线交互的人机工效研究中尚未涉及过。

因此,本文的研究问题是,在两种扫视运动控制的视线交互条件下人机工效的总体差异是否显著?在不同视线运动方向上是否有显著差异?视线交互工效模型是否仍能有效预测不同扫视运动下的人机工效?为回答这些问题,我们设计了如下实验。

4 实验及结果分析

4.1 实验概况

4.1.1 实验设备

如图1所示,视线输入设备选用头盔式眼动跟踪仪 Eye-link II,该设备及其相应的软件系统安装运行在一台奔腾三代专用电脑(主机)上。交互实验程序运行在主频 2.7G 的奔腾四代电脑(被试机)上,该机器安装运行 Windows 2000 操作系统,配备 24 寸液晶显示器,其分辨率设置为 1920×1200 像素。视点信号通过以太网从主试机传送到被试机。Eye-link II 具有多种跟踪模式,本实验执行过程中它运行在纯瞳孔模式(即眼动仪只跟踪瞳孔),信号采样频率设置为 250Hz。



图1 实验设备及环境

4.1.2 实验任务及过程

本实验的任务为简单的视线点击任务(Eye Pointing),即通过视线来驱动光标,使其连续驻留在目标上一定时间(如 800 ms)后完成对目标的激活(这相当于执行了一次鼠标点击操作)。实验正式开始前,实验员让被试者坐在电脑屏幕的正前方大约 70 厘米的位置,并确认被试者平视正前方时,视线落点是否大体在屏幕的中心。如果差距明显,则需调节椅子的位置或高度。这主要是便于被试者执行离心或向心的扫视眼动。当执行离心扫视测试任务时,测试启动按钮总是出现在屏幕中心位置,被试刺激物将按给定的距离(即振幅, A)随机出现在 8 个方向上(每个方向间隔 45°)。启动按钮显示一个直径为 32 像素的实心圆,但其实际有效区域的直径有 120 像素,如图 2 中虚线圆圈所示。每次测试,被试者首先需注视启动按钮,眼标(Eye cursor)进入启动按钮有效区域并驻留 450ms 后,触发开始指令,启动按钮消失,目标同步显示。此时,测试计时开始。实验任务要求被试者尽可能快速转移视线,注视目标的中心。光标进入目标区域时,驻留时间(Dwell Time)计时器开始计时,达到预定义的触发阈值 800ms 时,视作相应的目标被成功点击选中。由于眼动仪跟踪精度和人眼

生理性震颤(Eye Jitter)等问题,眼标并不能稳定地停留在某一个屏幕坐标点上。当用户凝视目标时,眼标进入目标区域后会在一定区域内颤动。此时,我们以 40 次/s 的频率对眼标在屏幕上的坐标进行采样记录(当不在目标中时,不采样)。若眼标在目标区域内的驻留时间达到 800ms 前就飘出目标,计时器将被重置。如果测试开始 5s 后,目标还没被选中,则记录一次超时错误。对于一次测试任务(Trial),如果被试者不能成功选中所需的目標,他/她有 5 次重试机会。否则,实验员需重新校正眼动仪,且实验跳到下一个测试。每次测试任务结束后,目标消失,启动按钮重新出现在屏幕中间,重复上述过程。

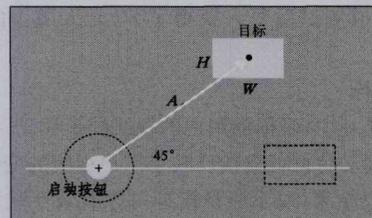


图2 实验任务界面

当执行向心扫视任务时,其过程与上面类似,区别主要在于目标始终出现在屏幕中心,而启动按钮随机出现在 8 个方向上。当执行向心离心混合扫视任务(即扫视眼动包含了向心离心两种组成部分)时,启动按钮也是随机出现在 8 个方向上,但目标出现在关于屏幕中心点的对称位置上。实验过程中,目标的宽度(W)、高度(H)、视线移动的距离(A)将按实验所设计的组合方式发生变化。

4.1.3 实验设计

本实验是一个可重复组内全交叉设计(Repeated Measures Within-Subject Design)的多因素实验。相应的因素及水平如下:

- 视线运动类别(Saccade Type, ST):向心、离心、离向心混合。
- 视线方向(Saccade Direction, SD): 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°。
- 任务难度指数(ID_{eye}):这是一个由 W、H 和 A 构成的组合因素。考虑到实验时长的限制和难度指数值的分布,我们考虑了 12 种组合,具体如表 1 所列。需要指出的是 ID_{eye} 主要用于模型拟合,而不是方差分析所考虑的因素。 ID_{eye} 的计算公式为:

$$ID_{eye} = 80 \times e^{\lambda A} \sqrt{\frac{\omega}{(W-\mu)^2} + \frac{1-\omega}{(H-\mu)^2}} \quad (11)$$

其中, λ 、 μ 、 ω 是根据实验观测数据确定的经验常数。比如在以前的相关工作中,它们分别约为 0.001、12、0.5。其中关于 μ , 可根据采样的眼标位置直接计算得到。乘以 80 是为了使 ID_{eye} 值与相应的 Fitts ID 分布在近似的数值区间里。

表1 决定任务难度指数 ID_{eye} 的组合(W, H, A)

No.	W	H	A	No.	W	H	A
1	46	46	550	7	80	120	400
2	46	60	400	8	90	60	550
3	46	90	400	9	90	80	400
4	46	120	400	10	120	46	550
5	60	60	550	11	120	60	400
6	80	46	550	12	120	120	400

将上述因素以全交叉方式产生 288 个组合(3 ST×8 SD

×12 ID_{eye})。对于这些组合,每个安排 1 次测试,组成一个测试组(Block)。实验时,SD 与 ID_{eye} 以随机的方式呈现给被试者,但不同 ST 的出现顺序在所有被试者之间进行了平衡。考虑到单次实验的总时间(任务总量)不宜太长,每个被试者只有 5 个测试组。本次实验一共设计了 21600 次测试(288 Trials×5 Blocks×15 Subjects)。

4.1.4 被试者

共有 15 名被试者成功完成了本实验,其中女性 8 名,男性 7 名,平均年龄 23.8 岁。所有被试者都有正常的或校正到正常的视力。只有一名被试者此前接触过眼动仪,参与过 UI 可用性评估方面的实验。他们是通过网络招募的方式来参与本实验的,完成测试后每人获得了 30 元人民币的劳务费报酬。

4.2 测量指标

在视线交互中,眼标随用户的视线同步移动。因此,眼标在屏幕上的运动特征就直接反映了用户视线的变化情况。根据此前的研究结果,以下测量指标可以有效反映用户视线稳定性(即注视专注度)的状态。

- 眼标轨迹采样点到样点中心的平均距离(AD):当光标进入目标区域后,其轨迹的坐标将以 25Hz 的频率进行采样。对于每个测试任务,计算各采样点到其中心的平均距离。AD 可视作眼标震颤区域的平均半径。

对于视线点击任务的工效,使用如下两个主要指标来表达:

- 视线的移动时间(Eye Movement Time, EMT):表示视线从启动按钮快速移动到所需目标中心点所需的时间。实际中,此时间是以每次测试的开始时刻(即启动按钮触发并消失)到光标首次进入目标区域时(即首次进入目标的事件发生时)所耗费的时间来近似表示的。

- 视线点击时间(Eye Pointing Time, EPT):表示从测试的开始时刻起,到光标进入目标区域并驻留足够长时间,成功激发选中该目标时为止的时间。EPT 主要由 EMT 和驻留时间(Dwell Time)两部分组成,但通常大于两者之和,因为光标驻留时间的连续性可能会中断而需重新计时。

4.3 实验结果及分析

包含错误测试在内,本实验共收集了 22473 次测试(Trials)的数据,其中发生错误的测试有 887 次,错误率约为 3.9%。对眼标位置的采样记录共有 43.5 万余条,其主要目的是统计计算每次测试中眼标的震颤半径 AD。通过数据预处理计算出每次测试的 EMT、EPT、AD 等指标,并排除其中的异常值(Outliers)。所谓异常值,指那些比其同等条件下所有观测值的平均数大 3 倍的值。根据正态分布理论,这样的观测值属于“小概率事件”。本实验共记录有 712 个异常值,约占总数的 3.2%。在下面的结果分析中,错误数据和异常数据都被排除在外。下面的方差分析揭示了各关键因子对工效测量指标 EMT 和 EPT 的影响。

4.3.1 对指标 AD 的影响

方差分析表明,实验因素眼动类型 ST($F_{2,28} = 5.1, p < 0.05$)和眼动方向 SD($F_{7,98} = 7.8, p < 0.001$)对 AD 均有显著的影响。这两个因素对指标 AD 的交互效应($F_{14,196} = 3.27, p < 0.001$)同样十分显著。在向心、混合与离心 3 种不同 ST 条件下,AD 的平均值分别为 9.0、9.5 和 9.6 pixel;在 8 个不同运动方向上(从小到大),AD 的平均值分别为 9.2、10.0、

9.0、9.0、8.7、9.2、9.9、10.1 pixel。对于不同的 ST 类型,向心运动条件下的 AD 最小。

两两对比分析发现,总体上向心运动的 AD 要显著低于其它两种条件下的,而离心与混合两种运动的 AD 差异不显著。对 AD 在不同方向上的均值对比分析结果表明,它在水平方向的值最小(0° 与 180° 之间没有显著差异, $p = 0.058$),其随着角度的增加而递增,在 45° 方向到达最大值后依次递减(见图 3)。同时,以水平方向为对称轴,除 90° 与 270° 外($p = 0.013$),其它对称方向之间没有显著差异。

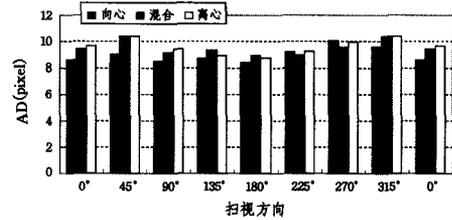


图 3 AD 在不同方向下 3 种扫视运动的均值

4.3.2 对指标 EMT 和 EPT 的影响

实验因素 ST 对 EMT($F_{2,28} = 67.7, p < 0.001$)和 EPT($F_{2,28} = 66.3, p < 0.001$)均有显著影响。SD 对 EMT($F_{7,98} = 8.0, p < 0.001$)和 EPT($F_{7,98} = 3.4, p < 0.005$)均有显著的影响。ST 和 SD 两个因素对 EMT 的交互效应($F_{14,196} = 2.7, p < 0.005$)显著,但对 EPT 的交互效应($F_{14,196} = 0.78, p = 0.690$)不显著。EMT 在向心、混合、离心 3 种 ST 条件下的平均值为 356.9、385.0、452.5ms,不同均值之间均有显著差异($p < 0.005$);EPT 相应的均值分别为 1373.0、1464.4、1627.2ms,不同均值之间的差异也达到极显著水平($p < 0.001$)。依照扫视运动方向从 0 度到 315 度的顺序,EMT 的均值分别为 388.6、396.5、401.9、385.9、355.5、391.6、443.5、421.4 ms;EPT 相应的均值分别为 1448.5、1485.9、1505.2、1481.0、1437.6、1479.3、1539.4、1528.4 ms。由图 4 和图 5 可知,在所有测试的扫视方向上,视线点击任务的工效均保持了一致的高低顺序,即向心最优,离心最差。

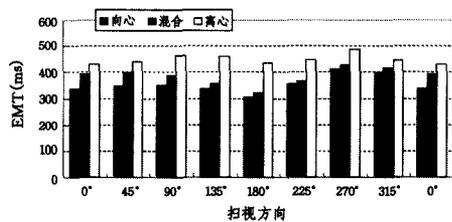


图 4 EMT 在不同方向下 3 种扫视运动的均值

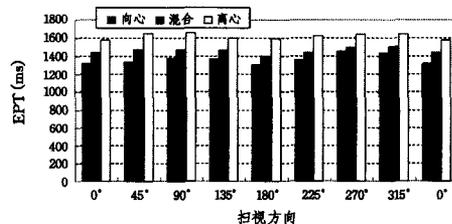


图 5 EPT 在不同方向下 3 种扫视运动的均值

进一步分析发现 EMT 在水平方向最低,随着运动方向的变化在垂直方向达到最大值。其随着方向变化的趋势类似于 AD,在横轴(水平方向)两侧仍表现出一定的对称性。如图 5 所示,EPT 虽然仍在水平方向最小,在垂直方向达到最

大值,但其随运动方向变化而变化的趋势不如 EMT 明显。

4.3.3 模型拟合

根据前面所述 AD 在 3 种 ST 条件下的平均值,当拟合 EPT 时,经验常数 μ 可分别设置为 18, 19, 19 pixel; 当拟合 EMT 时,由于它理论上不包含眼标在目标区域内的驻留时间成分,眼睛的生理震颤不会对其产生影响,因此 μ 均设置为 0。对于经验常数 λ , 根据以往的研究结果,拟合 EMT、EPT 时均设置为 0.001。下面两个方程分别代表了针对 EMT 和 EPT 的工效模型:

$$EMT = a + b \times 80 \times e^{0.001A} \sqrt{\frac{\omega}{W^2} + \frac{1-\omega}{H^2}} \quad (12)$$

$$EPT = a + b \times 80 \times e^{0.001A} \sqrt{\frac{\omega}{(W-\mu)^2} + \frac{1-\omega}{(H-\mu)^2}} \quad (13)$$

从表 2 中的拟合结果可见, EMT 和 EPT 在 3 种不同视线扫视类型条件下,数据回归拟合度(R^2)均超过了 0.93。换句话说, ID_{eye} 模型在总体上仍能准确表达单纯的向心或离心视线运动条件下的人机工效,从而更有力地验证了该模型的有效性。图 6、图 7 显示, EMT 和 EPT 的回归系数 b 在向心、混合、离心 3 种条件下依次增加,尤其是离心条件下的系数 b 明显高于其它两种。回归系数 b 的变化是导致人机工效 (EMT 和 EPT) 变化的主要因素,间接反映了眼动神经控制系统的效率。

表 2 不同视线类型条件下对 EMT 和 EPT 的模型拟合

工效指标	ST	a		b		ω		R^2
		Est.	SE	Est.	SE	Est.	SE	
EMT	向心	69.4	24.5	145.5	12.0	0.448	0.050	0.950
	混合	72.4	18.4	158.0	9.0	0.393	0.035	0.977
	离心	-15.0	46.9	236.7	23.0	0.403	0.060	0.934
EPT	向心	934.5	30.5	148.9	9.8	0.433	0.040	0.963
	混合	917.4	34.9	180.7	10.8	0.310	0.038	0.972
	离心	863.3	73.2	252.0	22.8	0.367	0.056	0.936

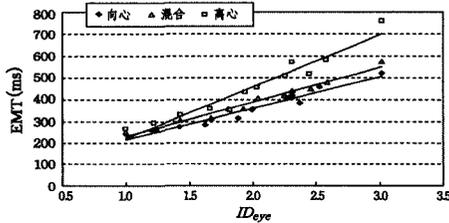


图 6 EMT 在不同扫视类型下的回归直线

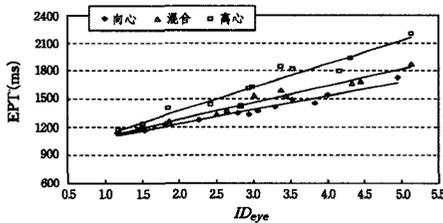


图 7 EPT 在不同扫视类型下的回归直线

表 3—表 5 分别列出了不同视线扫视条件下,对 EMT、EPT 分别在各具体方向上的实验数据的模型拟合结果。从中我们可以看出,虽然模型在一部分方向上的数据拟合度有所降低,个别方向上的 R^2 甚至小于 0.8。但是,大多数情况下, R^2 仍然十分接近或超过 0.9。换句话说,即便进一步细分考虑视线运动方向这一因素,模型仍能有效预测视线点击任务的人机工效,再次验证了 ID_{eye} 模型的有效性和适用性。

表 3 不同向心运动方向条件下 EMT 和 EPT 的模型拟合

工效指标	SD	a		b		ω		R^2
		Est.	SE	Est.	SE	Est.	SE	
EMT	0°	100.7	22.4	121.0	11.0	0.550	0.054	0.931
	45°	105.8	23.0	123.5	11.3	0.448	0.055	0.933
	90°	81.1	23.3	136.6	11.4	0.356	0.052	0.947
	135°	10.1	45.0	167.5	22.1	0.453	0.080	0.869
	180°	47.4	40.9	132.4	20.1	0.544	0.090	0.828
	225°	68.1	18.4	145.7	9.0	0.389	0.038	0.969
	270°	71.5	41.3	173.7	20.2	0.412	0.072	0.897
	315°	66.4	39.2	168.2	19.2	0.446	0.070	0.899
EPT	0°	981.2	63.5	116.5	20.4	0.399	0.108	0.792
	45°	972.8	61.4	124.4	19.8	0.457	0.097	0.817
	90°	901.1	50.6	162.6	16.2	0.340	0.062	0.925
	135°	884.3	41.2	166.2	13.3	0.442	0.049	0.947
	180°	881.5	66.6	146.3	21.5	0.614	0.087	0.839
	225°	948.3	29.7	140.7	9.6	0.400	0.042	0.962
	270°	970.4	49.0	168.7	15.7	0.335	0.058	0.934
	315°	938.3	63.2	168.5	20.4	0.480	0.073	0.885

表 4 不同混合运动方向条件下 EMT 和 EPT 的模型拟合

工效指标	SD	a		b		ω		R^2
		Est.	SE	Est.	SE	Est.	SE	
EMT	0°	35.8	53.9	181.9	26.4	0.416	0.089	0.848
	45°	21.9	40.9	192.1	20.1	0.416	0.064	0.915
	90°	52.8	29.0	169.8	14.1	0.281	0.054	0.951
	135°	31.0	34.5	165.4	16.9	0.425	0.063	0.918
	180°	76.2	33.1	125.6	16.2	0.492	0.078	0.871
	225°	113.4	29.0	128.9	14.3	0.456	0.067	0.904
	270°	88.2	24.7	171.2	12.1	0.343	0.045	0.962
	315°	156.5	41.4	132.0	20.2	0.353	0.096	0.842
EPT	0°	886.9	120.8	183.8	37.7	0.488	0.124	0.726
	45°	825.8	59.2	214.8	18.4	0.364	0.053	0.942
	90°	902.9	72.3	191.4	21.9	0.102	0.070	0.924
	135°	765.1	94.3	230.8	29.2	0.309	0.079	0.886
	180°	962.3	59.2	146.7	18.5	0.444	0.077	0.877
	225°	963.0	41.4	159.8	12.9	0.403	0.050	0.947
	270°	977.3	49.5	174.2	15.2	0.200	0.055	0.949
	315°	1046.3	48.0	152.1	14.8	0.266	0.061	0.932

表 5 不同离心运动方向条件下 EMT 和 EPT 的模型拟合

工效指标	SD	a		b		ω		R^2
		Est.	SE	Est.	SE	Est.	SE	
EMT	0°	-63.4	51.9	251.7	25.4	0.374	0.063	0.923
	45°	1.9	43.2	221.9	21.2	0.350	0.060	0.932
	90°	12.5	82.4	231.0	40.2	0.306	0.111	0.813
	135°	-40.1	66.4	254.2	32.6	0.430	0.078	0.877
	180°	-82.3	62.2	263.2	30.5	0.504	0.069	0.893
	225°	-7.6	63.6	231.4	31.2	0.509	0.081	0.860
	270°	-44.9	77.2	269.8	37.8	0.423	0.086	0.857
	315°	109.6	50.0	169.8	24.4	0.283	0.093	0.868
EPT	0°	747.8	104.6	277.7	32.7	0.509	0.071	0.889
	45°	927.8	72.5	237.6	22.6	0.383	0.059	0.929
	90°	899.4	202.7	258.4	61.5	0.126	0.148	0.732
	135°	862.3	83.6	245.4	26.0	0.372	0.066	0.913
	180°	779.8	116.7	273.1	36.5	0.575	0.080	0.862
	225°	889.9	131.6	241.8	41.1	0.440	0.104	0.798
	270°	913.8	107.7	242.7	33.2	0.234	0.086	0.879
	315°	918.2	103.8	238.8	32.1	0.269	0.085	0.878

5 结果讨论

眼球的运动是由 3 对拮抗肌肉协同作用的结果。在神经生理学领域,研究人员很早就注意到了离心与向心两种扫视类型在动力学特性方面的差异。相关研究反复证实,对于一个给定的扫视距离(即振幅),向心运动比离心运动快。然而,这类研究通常将扫视运动的方向限定在水平往复方向上,没

有系统考虑其它不同的扫视方向。当视线运动用于人机交互时,根据用户界面的设计布局,用户的视线往往需要在不同方向上进行扫视。因此有必要探索两种扫视类型在不同方向上的动力学特性。这是本文把视线运动方向 SD 作为一个主要实验因子的原因。

从神经生理学研究角度得到向心扫视快于离心扫视的定性结果,但其对视线交互的理论指导意义还不够充分。在关于视线交互人机工效的研究中,前期研究定义了全新的视线点击任务难度指数 ID_{eye} 。该指数除了包含目标尺寸、目标距离等两种决定任务本身的 UI 设计因素外,还同时考虑了扫视(Saccades)和注视(Fixations)两种相关眼动的生理特征。在不同的验证实验中,该指数与任务耗时指标(EMT、EPT)均保持了明显的线性相关($R^2 > 0.9$)。此项研究首次为视线交互的人机工效建立了一个定量模型,对 UI 设计等实践工作具有重要的理论指导意义。

- 降低视线移动距离或者增加目标尺寸可有效改善视线交互的人机工效,而且增加目标尺寸的“收益”比减小相同比例的移动距离更高。这一点,与传统交互界面有所不同。在传统的交互界面中,依据 Fitts 法则,当目标尺寸和移动距离同时改变相同的比例时,难度指数会保持不变,即在一定程度上人机工效与 UI 的比例尺无关(Scale Independence)。在视线交互界面中,根据 ID_{eye} 的定义其人机工效不具备这一特性。

- 对于矩形目标, ID_{eye} 中的权重系数 ω 总体小于 0.5,因此通过增加目标高度来改善工效比增加宽度更有效。

- 权重系数 ω 的变化与视线运动方向存在一定的相关性。

- 在水平方向或接近于水平方向上的工效最优,而在垂直方向上或接近于垂直方向上的工效最差,因此,UI 设计布局时应尽可能利用水平方向。

- 提高眼标的稳定性,即减小经验常数 μ 对改善工效也有明显效果。通过设计良好的视点信号处理算法来提高眼标的稳定性可降低任务的难度指数,从而有效提高视线交互的工效。

需要指出的是在我们以前的验证实验任务中视线运动同时包含了向心和离心两种成分,而且由于实验设置的视线扫视距离以屏幕中心为对称点,这两种成分的比重大致相当。一个自然而然的疑问是, ID_{eye} 的有效性是两种视线扫视运动产生了某种中和效应(Neutralizing Effect)之后才成立?或者说, ID_{eye} 在纯粹的向心或离心扫视条件下,是否依然有效?本文的实验结果表明,在单纯的向心或离心扫视条件下, ID_{eye} 所表达的点击任务难度指数与任务耗时仍有显著的线性相关性。换言之,基于的 ID_{eye} 线性模型,仍能有效预测单纯向心或离心扫视条件下的人机工效。这就意味着,当扫视运动混合有向心和离心两种成分时,即便它们比重不一致, ID_{eye} 依然会有效。这一点是对 ID_{eye} 有效性问题的重要补充。

此外,本文的实验也进一步验证了此前相关研究的结果。一是权重系数 ω 在绝大多数情况下小于 0.5,说明即便在单纯的向心或离心扫视条件下,目标高度对工效的影响同样大于目标宽度的影响;二是视线点击任务的工效在水平方向达到最优,而在垂直方向最差。

结束语 本文通过实验调查研究了在向心或离心扫视运动下,视线交互的工效问题。实验结果很好地回答了我们提

出的研究问题,进一步完善了关于视线交互人机工效的研究结论。实验结果表明,视线扫视的运动类型对交互工效有显著影响,向心运动条件下的工效要优于离心条件下的工效。对于视线扫视运动的方向因素来说,它对交互工效也有显著影响,并且对于不同的扫视类型,都在水平方向达到最优工效水平,而在垂直方向的工效最低(耗时最长)。数据拟合结果表明,在单纯的向心或离心扫视运动条件下,基于 ID_{eye} 的工效模型仍然有效($R^2 > 0.93$)。模型的回归系数还表明,向心与离心扫视两种条件下的工效差距主要由回归方程斜率决定。离心条件下的斜率明显高于向心条件下的,其导致不同条件下的工效差距会随着难度指数 ID_{eye} 的增大而越发明显。本文的研究进一步验证了 ID_{eye} 模型对于视线交互的有效性和适用性。在 UI 设计方面,我们获得的新的指导原则是应更多地利用向心视线运动。

参考文献

- [1] Bolt R A. Eyes at the interface [C]// Proc. CHI'82. ACM Press,1982;360-362
- [2] ETRA[OL]. <http://www.etra2012.org/>
- [3] Zhang Xin-yong, Ren Xiang-shi, Zha Hong-bin. Modeling dwell-based eye pointing target acquisition [C]// Proc. CHI 2010. ACM Press,2010;2083-2092
- [4] Zhang Xin-yong, Zha Hong-bin. Human performance modeling for two-dimensional dwell-based eye pointing [C]//Proc. PACIS 2012. 2012;96
- [5] Pelisson D,Prablanc C. Kinematics of centrifugal and centripetal saccadic eye movements in man [J]. Vision Research,1998,28(1);87-94
- [6] Ware C, Mikaelian H H. An evaluation of an eye tracker as a device for computer input [C]// Proc. CHI 1987. ACM Press,1987;183-188
- [7] Miniotos D. Application of Fitts' law to eye gaze interaction [C]// CHI 2000 Extended Abstracts. ACM Press,2000;339-340
- [8] Vertegaal R. A Fitts' law comparison of eye tracking and manual input in the selection of visual targets [C]//Proc. ICM 2008. ACM Press,2008;241-248
- [9] MacKenzie I S. A note on the information-theoretic basis for Fitts' law [J]. Journal of Motor Behavior,1989,21(3);323-330
- [10] Meyer D E, Smith J E K, Kornblum S, et al. Optimality in human motor performance; Ideal control of rapid aimed movements [J]. Psychological Review,1988,95(3);340-370
- [11] MacKenzie I S. Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction [J]. Human-Computer Interaction,1992,7(1);91-139
- [12] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. The Bell System Technical Journal,1948,27;379-423,623-656
- [13] Luce R D. Whatever happened to information theory in psychology? [J] Review of General Psychology,2003,7(2);183-188
- [14] Harris C M, Wolpert D M. The main sequence of saccades optimizes speed-accuracy trade-off [J]. Biological Cybernetics,2006,95(1);21-29
- [15] Krebs R M, Schoenfeld M A, Boehler C N, et al. The saccadic re-centering bias is associated with activity changes in the human superior colliculus [J]. Frontiers in Human Neuroscience,2010,4;193