

• 研究方法(Research Method) •

## 微眼动的识别技术\*

张 阳 李艾苏 张少杰 张 明

(苏州大学心理学系, 苏州 215000)

**摘 要** 微眼动是人在注视过程中产生的幅度和速率都相对较大的眼动, 它与多种高级认知功能如注意、知觉等有着密切的联系。微眼动研究中的一个重点和难点是如何有效地识别微眼动。文章对微眼动的识别技术进行了综述, 包括: 1) 微眼动的基本参数及发展; 2) 几种有代表性的微眼动技术, 包括传统基于经验的识别技术、新近的基于速率变异的识别技术、基于小波分析的识别技术以及基于聚类分析的识别技术; 3) 对这些技术之间各自的优、缺点进行了比较并就新的研究方向进行了展望。

**关键词** 微眼动识别; 主观阈值技术; 客观阈值技术; 多指标分析

**分类号** B841

### 1 引言

眼动是人类视觉系统探索外部世界的一项重要工具(Kowler, 2011)。视觉系统在搜索目标客体时常常通过眼动来调节注视位置, 以便对视野中的目标客体位置进行注视和进一步的精细加工(Rucci & Victor, 2015)。Dodge (1907)在对视觉注视进行考察时发现, 眼动不仅存在于注视位置的改变过程中, 在注视的过程中也存在不少较大幅度的眼动(大于约  $0.15^\circ$ , 约相当于 12 个感光细胞)。研究者们将这种存在于注视过程中较大幅度的眼动称为微眼动(Martinez-Conde, Macknik, & Hubel, 2004; Martinez-Conde, Macknik, Troncoso, & Hubel, 2009; Zuber, Stark, & Cook, 1965)。

与眼动得到的广泛关注相比, 在很长的一段时间内微眼动并未得到研究者的关注(Engbert, 2006; Laubrock, Kliegl, Rolfs, & Engbert, 2010)。早期的研究认为微眼动可能仅起着校正注视漂移的作用, 并未在认知过程中发挥更重要的作用(Engbert, 2006; Rolfs, 2009)。与早期研究不同, 近年来越来越多的研究发现, 微眼动在一些高级认

知功能, 如知觉、注意加工等过程中也起着重要的作用(Engbert & Kliegl, 2003; Gautier, Bedell, Siderov, & Waugh, 2016; Masquelier, Portelli, & Kornprobst, 2014; Meyberg, Werkle-Bergner, Sommer, & Dimigen, 2015; Troncoso, Macknik, & Martinez-Conde, 2008; White & Rolfs, in press), 如 Yuval-Greenberg, Merriam 和 Heeger (2014)的研究发现自发微眼动能诱发空间注意, 从而促进对随后出现在其运动方向上刺激的加工; 类似, Hafed (2013)的研究也发现微眼动能相当程度上改变对客体空间位置的知觉, 使之偏向微眼动终点的位置; 甚至有一些研究认为许多传统上归因于注意的效应可能更多的是反映了微眼动的变化, 如外周线索提示效应和注意震荡效应等(Chen, Ignashchenkova, Thier, & Hafed, 2015; Hafed, 2013)。

鉴于微眼动在知觉和注意等高级认知加工过程中所发挥的重要作用, 它得到了研究者们越来越多的关注, 也涌现出许多与微眼动相关的研究。我们以“microsaccades”、“microsaccade”、“miniature eye movements”、“microsaccadic”或“fixational eye movements”为关键词在“web of science”数据库(SCI, SSCI)中搜索共发现 407 篇文献, 分布年代如图 1 所示, 从中不难看出, 相关研究报告的数量从 2000 年起有一个明显的提高, 并在随后保持逐年递增的趋势。进一步的量化分析

收稿日期: 2016-07-11

\*国家自然科学基金项目资助(NSFC: 31300833/31371025)。

通讯作者: 张阳, E-mail: yzhangpsy@suda.edu.cn

张明, E-mail: psyzm@suda.edu.cn

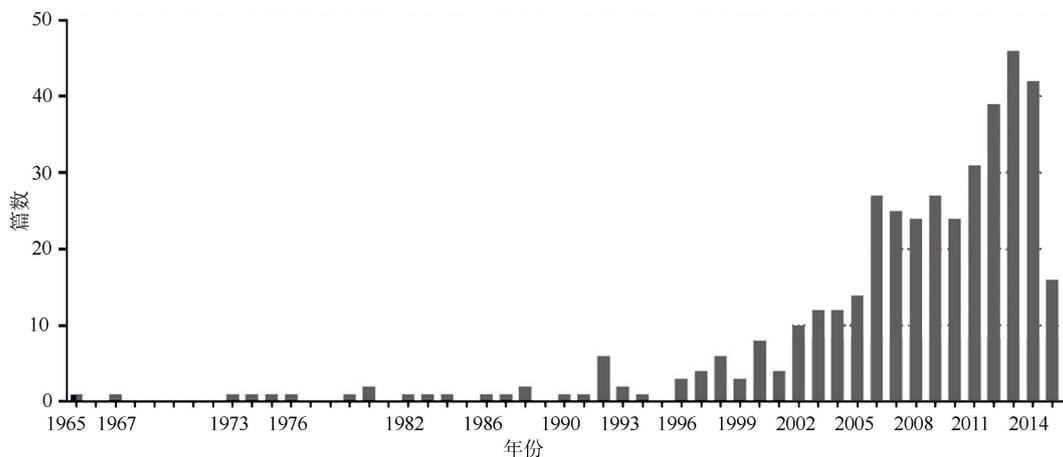


图 1 1965 至 2015 年间发表的关于微眼动的文献

发现, 2000 年后发表的文献量占到了总文献量的 88.14%, 平均每年约 21 篇, 超过了 1965~1990 的 25 年间研究数量的总和(15 篇)。这一变化趋势, 在很大程度上与分析技术的发展密切相关: 与研究数量在 2000 年左右的明显转折相对应, Martinez-Conde 团队正于同年提出了一系列客观识别、分析微眼动的程序和方法(Martinez-Conde, Macknik, & Hubel, 2000, 2002)。

与微眼动在国外受到的高度关注相比, 迄今为止, 国内的相关研究还寥寥可数, 我们以“微眼动”或“微眼跳”为关键词在中国知网的数据库中进行搜索, 仅搜索到了一篇以猕猴为被试的实验研究(叶晶莹, 薛林雁, 黄丹, 杨月皎, 陈垚, 2014)和一篇简略介绍单一微眼动识别技术的综述(魏薇, 史更虎, 李玉堂, 张冰, 高闯, 2013)。这一研究领域尚未得到国内研究者们关注的一个可能原因在于研究者对复杂的微眼动识别、分析技术的不了解(当前几乎所有的商业眼动分析软件, 如 Eyelink 的 DataViewer, SMI 的 BeGaze 等, 都未提供识别、分析微眼动的模块)。本文正是针对这一现状拟对微眼动识别、分析技术的历史、进展以及各种方法的优、缺点进行综述, 以为研究者了解和应用微眼动技术提供一定的帮助。

## 2 微眼动基本参数及发展

### 2.1 微眼动的参数

在微眼动的识别和分析技术中, 主要涉及的眼动参数有眼球位置、方向、频率、速率、加速

度、幅度和持续时间等。考虑到微眼动识别在很大程度上依赖于对这些参数的合理界定, 我们首先对这些参数进行简单的介绍。

**眼球位置:** 眼球位置主要通过眼动仪来记录, 每个采样点代表一个眼球位置, 完整的眼球位置图即为眼动轨迹。以图 2 为例, 该微眼动(虚线所示箭头)共有 6 个采样点, 通过这些位置数据可以计算得到该微眼动的衍生参数(如幅度、速率等)。另外, 每个眼球位置对应一个水平和一个垂直位置, 因而可以计算得到每个采样点的水平和垂直衍生参数如速率等。

**方向:** 微眼动的方向指的是微眼动从开始位置指向结束位置的矢量方向(即图 2 中灰色箭头的方向)。有研究表明这一指标同注意的朝向有着密切联系(Meyberg et al., 2015; Yuval-Greenberg et al., 2014)。

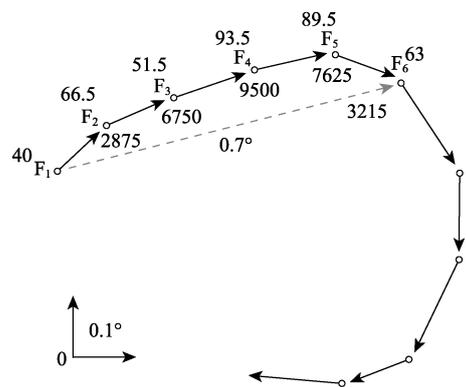


图 2 一个模拟微眼动过程的示意图(非真实数据), 箭头内、外的数字分别代表加速度和速率

**频率:**微眼动的频率指的是单位时间(秒)内微眼动的次数,在 1~4 Hz 之间,通常为 1~2 Hz (Martinez-Conde et al., 2004)。

**速率:**微眼动的速率是微眼动分析中的核心参数,包括瞬时、峰值和转弯速率三种(Engbert, 2006; Hafed, Goffart, & Krauzlis, 2009; Martinez-Conde et al., 2002)。瞬时速率指的是一个微眼动期间某个采样点的运动速率;峰值速率指的是一个微眼动期间最大的瞬时速率(图 2 中  $F_4$  点),微眼动的速率通常指微眼动的峰值速率,常位于微眼动中央采样点附近;转弯速率指连续两个眼动在方向上变化的角速度(Hafed et al., 2009)。由于记录到的眼动轨迹处于一个二维平面,速率常被进一步分解为水平和垂直速率。

**加速度:**即速率的变化速度,微眼动研究中常见的加速度指标主要有瞬时加速度、初始加速度峰值和末加速度峰值。初始加速度为微眼动起始时间到达到峰值速率时间点之间的最大瞬时加速度。末加速度峰值为微眼动的峰值速率时间点到终止时间点之间,最大的瞬时加速度(Hafed et al., 2009; Otero-Millan, Castro, Macknik, & Martinez-Conde, 2014)。以图 2 为例,微眼动的峰值速率为采样点  $F_4$  的速率,初始加速度峰值为  $F_1$  到  $F_4$  期间最大的瞬时加速度,末加速度峰值为  $F_4$  到  $F_6$  期间最大的瞬时加速度。

**幅度:**微眼动的幅度是指微眼动的初始位置指向最终位置的向量的模,即初始到结束位置的空间距离,如图 2 中的灰色箭头。尽管目前就微眼动的幅度范围未有一个明确一致的定义(Nyström, Hansen, Andersson, & Hooge, 2016),但从大多数研究的结果来看微眼动的幅度通常介于 12 弧分到 1 度视角之间(Martinez-Conde, Otero-Millan, & Macknik, 2013)。

**持续时间:**微眼动的持续时间指微眼动起迄

的时间差。以图 2 为例,微眼动的持续时间为  $F_6$  与  $F_1$  的时间差,即 6 ms。微眼动的持续时间通常在 6 到 30 ms 之间(Engbert, 2006)。

## 2.2 微眼动识别技术的发展

“如何正确地识别微眼动”是有效展开微眼动相关研究的基础也是微眼动研究领域的一个热点问题。在过去的半个世纪,微眼动识别经历了从早期主观、简单到近些年客观、精细的发展过程(图 3)。早期关于微眼动的研究相对较少,算法也颇为简单,主要依赖上述微眼动参数中的 1~2 种参数如幅度(Zuber et al., 1965)和持续时间(Leopold & Logothetis, 1998)。到 2000 年左右微眼动识别的算法逐渐趋于成熟,开始综合考虑多种眼动参数如速率、方向、幅度、持续时间和加速度等,这其中的代表是 Martinez-Conde 等人(2000)提出的多指标分析法。新近识别技术则与上述需要主观确定阈值的方法不同,开始致力于寻求一些利用微眼动统计特性来客观确定阈值,这其中的代表是 Engbert 及其合作者提出的以眼动速率分布离散度为基础的识别方法(E&K 法, Engbert & Kliegl, 2003; Engbert & Mergenthaler, 2006; Mergenthaler & Engbert, 2010), Bettenbühl 等人(2010)基于小波分析提出的主成分分析法和 Otero-Millan 等人(2014)提出的基于聚类分析(*k*-means)的识别方法。

## 3 微眼动的识别

### 3.1 早期主观阈值的识别技术

这类技术多是以一个或多个眼动参数为指标结合主观确定的阈值来定义微眼动。最初 Zuber 等人(1965)仅以眼动幅度在 1~30 弧分这一标准来定义微眼动,随后 Leopold 和 Logothetis (1998)提出的算法则在 Zuber 等的基础上增加了“持续时间大于 8 ms”的限制。Martinez-Conde 等人(2000)的

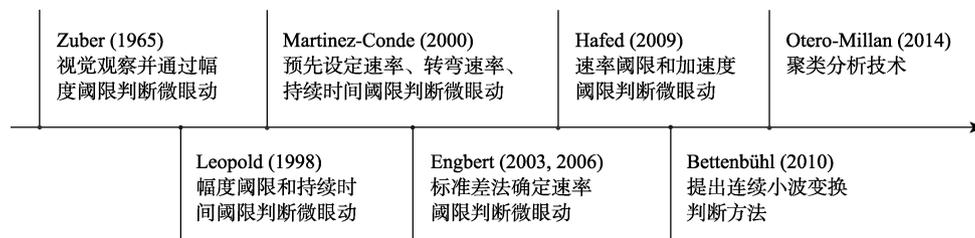


图 3 微眼动识别技术的发展历程

算法则开始表现出多指标分析的倾向,他们提出微眼动需要同时满足瞬时速率大于 3 度视角/秒、转弯速率小于 15 度视角/秒和幅度在 3 弧分~2 度视角间这三个指标。最近 Hafed 等人(2009)的算法还考虑到了加速度对微眼动的影响,增加了加速度需要大于 550 度视角/秒<sup>2</sup>的标准。

总的来讲,经过多年的发展,传统分析技术已从单一指标逐渐转向了多指标分析,相较而言后者因为提供了更多关于数据本质的信息,所以有望能提供更高、更有效的检验力。

### 3.2 E&K 识别技术

尽管传统主观阈值法经过多年发展已经能提供不错的检验力,但仍然存在以下两方面较为明显的不足。一方面,从信号检测的角度而言,检测微眼动的过程实质上就是将微眼动(信号)与其它注视眼动(噪音)区分出来的过程。考虑到有研究表明注视眼动(即噪音水平)常常在不同的任务(Mergenthaler & Engbert, 2010)、不同的个人间表现出较大差异,采用绝对阈值标准的传统方法不可避免地会导致在不同任务甚至同一任务的不同个体上表现出不同的检验力。换言之,传统阈值技术在很大程度上受到噪音水平的影响,同一阈值在不同噪音水平下有截然不同的检验力。另一方面,传统方法对阈值的确定很大程度上依赖于分析者的经验,这给数据分析结果带来了很大的不确定性。

为避免上述传统方法的缺陷,Engbert 和 Kliegl (2003)提出了一种对噪音水平敏感(即阈值随噪音水平变化而变化)的识别方法。该方法虽然

也是利用微眼动与注视漂移等在眼动速率的差别(图 4,微眼动相对而言有更高的眼动速率)来分离和识别微眼动,但将阈值的确定发展为了依赖噪音水平的相对阈值法:以噪音变异指标的倍数而非某个绝对的速度值作为微眼动识别的阈值。因为阈值会随噪音水平变化而变化,所以该方法很好地避免了噪音水平的变化对检验力的影响。具体而言,该方法主要包含计算瞬时速率、计算速率分布的标准差和确定适当的标准差倍数作为决策阈值这三个过程:

**(1)计算注视眼动的瞬时速率** 如图 4(左)所示,原始眼动数据是每个采样时间点上眼睛中心对应的水平和垂直位置。E&K 法的第一步是分别计算每个采样点在水平(记为  $\overline{v_x}$ )和垂直方向的瞬时速率(记为  $\overline{v_y}$ )。为去除设备等导致的高频噪音,在计算瞬时速率时采用五点加权平均法(五点为该采样点及其前后各自 2 个采样点,参见公式 1)。该操作相当于构建了一个简单的低通滤波器来滤除原始数据中的高频噪音。

$$\begin{aligned} \overline{v_x} &= \frac{\overline{x_{n+2}} + \overline{x_{n+1}} + \overline{x_{n-1}} + \overline{x_{n-2}}}{6t} \\ \overline{v_y} &= \frac{\overline{y_{n+2}} + \overline{y_{n+1}} + \overline{y_{n-1}} + \overline{y_{n-2}}}{6t} \end{aligned} \quad (1)$$

公式 1 为五点加权平均法的计算公式,其中  $\overline{x_{n+2}}$ 、 $\overline{x_{n+1}}$ 、 $\overline{x_{n-1}}$  和  $\overline{x_{n-2}}$  表示在水平方向上第  $n$  个采样点分别同  $n+2$ 、 $n+1$ 、 $n-1$  和  $n-2$  个采样点之间的距离;垂直方向同理。

**(2)计算瞬时速率分布标准差** 在瞬时速率基础上,计算其分布的标准差。考虑到注视眼动速

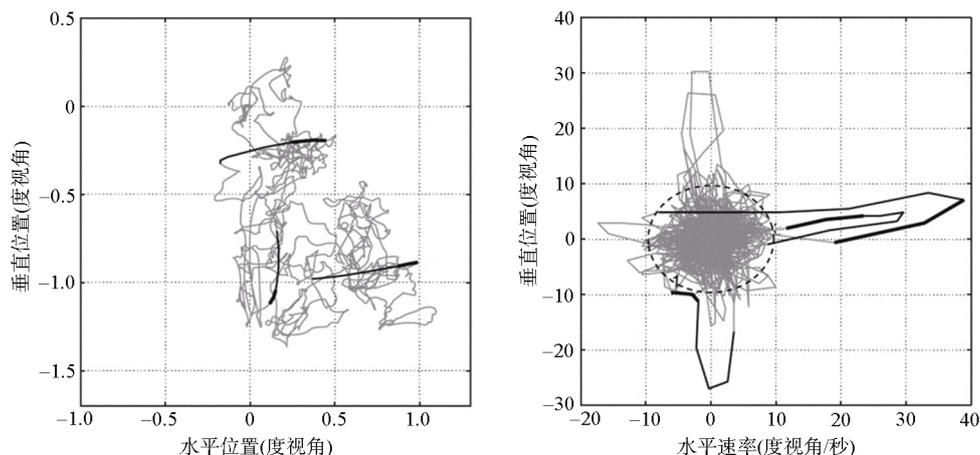


图 4 眼动位置(左)以及速度二维分布图(右) [引用并修改自 Engbert 和 Kliegl (2003)]

率多呈现出较大的偏态分布,为提高精确度,E&K法采用了中位数而非算数平均数来计算速率分布的标准差。

**(3)确定微眼动速率阈值** 从眼动速率的分布可见(图4右),微眼动在整个注视眼动速率的分布中相当于极端值。正是基于这一特性,Engbert和Kliegl(2003)提出以速率分布标准差的倍数(记为 $\lambda$ )为阈值来识别微眼动,即微眼动的速率 $v_{k,x}$ 须满足以下公式:

$$\frac{v_{k,x}^2}{\lambda\sigma_x} + \frac{v_{k,y}^2}{\lambda\sigma_y} > 1 \quad (2)$$

最初,他们基于经验选择了 $\lambda=6$ 或 $5$ ,即6倍或5倍标准差来作为微眼动识别的阈值,随后Engbert和Mergenthaler(2006)发展了 $\lambda$ 的确定方法,开始借助非参数置换分析(Permutation Test)的方法更为客观地确定 $\lambda$ 参数。具体而言,他们通过打乱速率时间序列数据生成一个速率的替代数据(通过傅里叶变换后打乱其相位信息,再通过反傅里叶变换生成替代数据)。虽然新生成的替代数据同原始数据有相同的分布,但相邻数据间的相关性已被打乱,考虑到理论上替代数据中发现的任何微眼动都是基于随机效应而得, $\lambda$ 的最优取值无疑需要能够最大化地区分原始和替换数据(Bettenbühl et al., 2010)。基于此,E&K法以一系列的 $\lambda$ 取值计算原始和替代数据各自识别的微眼动数目,最后以产生最大差异量的 $\lambda$ 作为最优 $\lambda$ 值。

与早期技术同时考虑了速率和持续时间指标相类似(Leopold & Logothetis, 1998),为进一步降低偶然因素引起的少数极端采样点带来的影响,E&K法识别出来的微眼动也至少要有3个采样点。另外,考虑到微眼动存在双眼一致性(Møller, Laursen, Tygesen, & Sjølie, 2002),E&K算法进一步将微眼动分为了双眼和单眼微眼动。满足双眼微眼动的条件为在某一一只眼发生微眼动期间,另一只眼也发生了微眼动,即双眼的微眼动在时间上有重叠。反之,单眼微眼动指某一眼发生微眼动期间,另一眼未发生微眼动。

需要指出的是,尽管利用置换分析的方法来确定最优化的 $\lambda$ 在理论上是一个较好的选择,但在实际操作时因微眼动识别过程中的其它限制条件,如需要同时超过若干持续时间(如3个采样点),导致 $\lambda$ 与置换前后数据中发现的微眼动数量差异的关系可能并不总是呈倒U形曲线,也就是

可能无法较好地找到最优 $\lambda$ 。无疑这些额外的限制条件对搜寻最优 $\lambda$ 的影响还有待新的研究来探明。

### 3.3 基于小波的识别技术

与E&K法或其它算法主要依赖微眼动具有较高运动速率这一特征且围绕速率指标展开不同,Bettenbühl等人(2010)注意到除速率外,微眼动在形态学特征(运动轨迹)上也同其它注视眼动(震颤和漂移)有着明显的不同:相较而言微眼动更似眼动运动曲线中间或出现的不规则的突变部分,即一个局部奇异点。因而他们采用了对之高度敏感连续小波转换技术来识别这些奇异值(即微眼动)。具体而言,这一方法包含以下三个步骤:

1)对数据进行连续小波转换,将一维眼动轨迹数据转换为时间和频率的二维空间数据。

2)在时间和频率二维空间利用模极值线的方法在模空间寻找局部最大值。模极值线是指在时间和频率的二维空间中,观察频率中所有满足公式(3)的局部最大值的点连成的一条线段。具体而言,首先在每个频率尺度下,搜寻所有的局部模极值。对某一 $b_0$ 点,若其模在 $b_0 \pm \varepsilon$ 的时间范围内具有最大值,则把该点称为模极值点;若 $b_0$ 在其对应的所有频率上都是极值点,则将这些极值点的连线定义为极值线,也就是奇异值出现的时间点。随后进一步以这些点为原点取其前后若干个点形成分段数据:

$$|w_s(a, b_0)| > |w_s(a, b_0 \pm \varepsilon)| \quad (3)$$

其中 $w_s$ 代表小波转换后的复数结果; $|\cdot|$ 代表取模,即复数空间对轴线的长度; $a$ 代表连续小波分析转换的尺度,在微眼动数据的分析中也就是频率,Bettenbühl等人(2010)将这个参数限定在20~50 Hz的范围; $b_0$ 表示某一特定的时间点; $\varepsilon$ 代表局部时间的变化范围,Bettenbühl等将该参数指定为小于等于3 ms。

3)在分段数据基础上,利用主成分分析法从分段数据中提取微眼动相关的主成分(如,具有最大变异解释量的1~2个成分)。

需要指出的是,尽管Bettenbühl等人(2010)的方法使得利用速率以外的指标来分析识别微眼动成为了可能,但从整体来看仍然存在以下三方面的不足:1)他们只考察了该方法在水平眼动上的应用,同样的方法是否适用于微眼动的垂直成分分析还有待考究;2)他们在算法的最关键部分,即利用模极值线方法选择局部奇异值的过程中选

择的分析参数采用了根据经验主观确定的方法, 同样的参数是否广泛适用于各种实验条件下的微眼动识别仍然是一个未知数, 还有待新的研究来探明; 3) 在识别出奇异值后, 如何确定分段数据的长度, 他们也并未给出明确的说明, 但这同微眼动的运动方向有着密切的关系也正是众多关于微眼动和注意关系研究所高度关注和依赖的指标(图 2), 无疑这是该识别方法中一个亟待理清的问题。

### 3.4 聚类分析识别技术

同前述技术采用某一特定指标(偶尔辅以另一指标为限制), 如 Engbert 和 Kliegl (2003) 利用眼动速率来区分微眼动和其它注视运动(漂移等), Bettenbühl 等(2010)利用眼动的形态学特征(运动轨迹)来识别微眼动不同, 新近 Otero-Millan 等人(2014)提出了一种利用  $k$ -means 聚类分析(Clustering)技术结合多指标分析的方法来识别微眼动。 $k$ -means 聚类分析法是统计分析中一种无监督分类(Unsupervised classification)方法, 将数据按照若干个变量(指标)分成不同的类别( $k$ ), 并尽量增大同一类别数据的相似性(即在指标空间中每一类别包含的数据点与该类别中心的距离平方和最小), 同时减小类别间数据的相似性(即指标空间中类别间的距离平方和最大化)。具体而言, 他们以峰值速率、初始加速度峰值和末加速度峰值这三种速度相关的数据作为分类指标(即特征值)将眼动数据分成若干个不同的  $k$  分类, 比如分为 2~5 类, 然后以各类别数下最小的平均 silhouette 系数(衡量各类别内部数据点间的距离和各类别间数据点之间距离的综合指标, 该系数越大表明各子

类内数据的聚合度和各子类间数据的分离度越好, 反之该系数越小则表示各子类内数据的聚合度和子类间数据的分离度越差)来确定最优化的类别数, 即  $k$  系数。最后利用“相较漂移和震颤而言, 微眼动有更大的幅值”这一特征从最优化的  $k$  类(如 3 类)数据类别中选取平均幅度最大的一类数据作为微眼动的类。该方法兼顾了微眼动的速率和加速度, 相较于早期单独基于微眼动速率的算法, 在信息利用上更加丰富, 信噪比更高, 有效地提高了微眼动识别的信效度。

## 4 识别技术的优、缺点比较及展望

### 4.1 优、缺点比较

表 1 呈现了几种微眼动识别技术的优缺点。早期微眼动的识别技术主要采用主观经验的方法来确定阈值参数以对微眼动进行甄别判断, 如 Zuber 等人(1965)通过眼动幅度来判断微眼动, Leopold 和 Logothetis (1998)通过眼动幅度和持续时间这两个参数来识别微眼动, 以及 Martinez-Conde 等人(2000)以速率辅以持续时间、幅度、转弯速率这三个参数对微眼动进行识别。这类通过主观设定阈值来识别微眼动的方法, 突出的优点是操作简单、方便, 极大地简化了微眼动识别的分析。但也伴随着明显的缺点: 一方面, 绝对阈值的确定方法对任务、个体等差异不敏感, 很难确定一个最优化的阈值标准, 对不同任务以及不同被试群体(如欧美 vs. 亚洲)并未达到相同程度的检验力。换言之, 固定的阈值可能仅可以较好地识别出特定个体或/和特定任务条件下的微眼

表 1 几种典型微眼动识别方法的优缺点比较

| 计算方法                                  | 优点                        | 缺点  |
|---------------------------------------|---------------------------|---|
| Zuber 等(1965)的早期主观阈值识别技术              | 单指标; 绝对阈值; 分析简单           | 阈值判定主观; 抗噪性差; 信息利用不充分                       |
| Leopold 和 Logothetis(1998)的早期主观阈值识别技术 | 双指标; 绝对阈值; 分析简单           | 阈值判定主观; 抗噪性差; 信息利用不充分                       |
| Martinez-Conde 等(2000)的早期主观阈值识别技术     | 单主要指标; 绝对阈值; 分析简单         | 阈值判定主观; 抗噪性差; 信息利用不充分                       |
| E&K 识别技术                              | 单主要指标; 相对阈值; 阈值确定客观; 抗噪性好 | 信息利用不充分                                     |
| 基于小波分析的识别技术                           | 利用形态学特征上的差别; 无需确定阈值       | 当前仅有对水平成分的分析; 分析指标单一; 信息利用不充分; 搜寻微眼动的分析参数主观 |
| 聚类分析识别技术                              | 充分利用多种指标信息; 无需确定阈值        | 仅考虑了速率及其衍生指标                                |

动,无法统一或推广到其它任务条件或/和其他群体中。另一方面,这些方法对阈值的确定主要依赖于研究者的主观经验,这降低了分析过程的客观性,不同研究者可能采用不一致的阈限,增加了不同研究间的比较难度也在一定程度上降低了可比性。

相较而言,E&K法在传统识别技术上有了很大的发展:一方面,E&K法中阈值参数的确定主要以眼动分布的离散程度(中数标准差)为基础,因而很好地避免了任务、个体等差异源对阈值的影响,使得该法可以灵活地适用于不同任务和个体间的不同噪音水平。另一方面,借助于非参数置换分析的技术,E&K法将早期阈值的主观确定法改进为了客观确定法,使得不同研究有了客观比较的平台,减小了如研究者的经验等主观因素对研究结果的影响。

与上述分析技术主要关注眼动速率指标不同,Bettenbühl等人(2010)提出的小波分析技术,从眼动轨迹的形态学特征入手来区分微眼动和噪音。需要指出的是,尽管这种识别技术为研究者识别微眼动提供了一个新的视角,同时也得到了一定程度的验证,但当前对该法的效度分析还主要集中在水平微眼动上,能否推广到垂直微眼动还有待进一步的验证,同时也存在分析参数的选择过于主观的问题,如何客观地确定分析参数也是该方法亟待解决的问题之一。

最后,同上述方法主要关注某一特定指标(如速率、幅度或运动轨迹等)不同,Otero-Millan等人(2014)提出的聚类分析法从信息量的角度对传统分析技术进行了扩展。该方法最大的优点在于将传统技术以某一指标(如速率、幅度等)为主要分析指标发展为了多指标分析,这扩展了信息的取样范围,提高了信息利用程度。

#### 4.2 展望

综上,微眼动识别技术在过去15年间有了很大的发展,整体而言呈现出从最初的单一指标、主观判断向多指标、客观判断发展的趋势。然而需要指出的是,尽管新近技术如E&K法以及聚类分析法相较传统分析技术无论在效度还是在客观性上均有了长足的进步,但仍然存在一些有待改进的空间。一方面,E&K识别法借助非参数置换分析解决了传统分析过于主观的问题,其主要采用的指标仍然是较为单一的速率指标。类似,

Otero-Millan等人(2014)的聚类分析尽管采用了多指标分析,但实际上也是采用了速率及其衍生指标(初始加速度峰值和末加速度峰值),在变量的性质上并未涉及更多不同质的指标,因而从信息利用率角度而言没有充分利用所有相关信息。另一方面,尽管Bettenbühl等人(2010)避开了速率指标转而依赖于微眼动的形态学特征(眼动轨迹)来识别微眼动,但直接去除包含丰富信息的速率指标以及分析参数选择的主观性在很大程度上限制了该方法的应用。解决上述算法各自不足的一个可能是结合这些方法各自的优点,综合利用多方面信息。具体而言,可以利用多指标分析技术(如聚类分析等)结合多种同质和/或非同质指标(如速率,形态学特征等),充分利用各种不同性质的指标提供的信息来发展出具有更高信效度的识别分析方法。

#### 参考文献

- 魏薇,史更虎,李玉堂,张冰,高闯.(2013).眼固视成分分离的研究现状及应用进展.《中国组织工程研究》,17(24),4553-4560.
- 叶晶莹,薛林雁,黄丹,杨月皎,陈磊.(2014).不同注意任务类型及难度对猕猴微眼动的影响.《生物化学与生物物理进展》,41(9),860-869.
- Bettenbühl, M., Paladini, C., Mergenthaler, K., Kliegl, R., Engbert, R., & Holschneider, M. (2010). Microsaccade characterization using the continuous wavelet transform and principal component analysis. *Journal of Eye Movement Research*, 3(5), 1-14.
- Chen, C. Y., Ignashchenkova, A., Thier, P., & Hafed, Z. M. (2015). Neuronal response gain enhancement prior to microsaccades. *Current Biology*, 25(16), 2065-2074.
- Dodge, R. (1907). An experimental study of visual fixation. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 8(4), 1-95.
- Engbert, R. (2006). Microsaccades: A microcosm for research on oculomotor control, attention, and visual perception. *Progress in Brain Research*, 154, 177-192.
- Engbert, R., & Kliegl, R. (2003). Microsaccades uncover the orientation of covert attention. *Vision Research*, 43(9), 1035-1045.
- Engbert, R., & Mergenthaler, K. (2006). Microsaccades are triggered by low retinal image slip. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(18), 7192-7197.
- Gautier, J., Bedell, H. E., Siderov, J., & Waugh, S. J. (2016). Monocular microsaccades are visual-task related. *Journal of Vision*, 16(3), 37.
- Hafed, Z. M. (2013). Alteration of visual perception prior to microsaccades. *Neuron*, 77(4), 775-786.

- Hafed, Z. M., Goffart, L., & Krauzlis, R. J. (2009). A neural mechanism for microsaccade generation in the primate superior colliculus. *Science*, 323(5916), 940–943.
- Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25 years. *Vision Research*, 51(13), 1457–1483.
- Laubrock, J., Kliegl, R., Rolfs, M., & Engbert, R. (2010). When do microsaccades follow spatial attention? *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(3), 683–694.
- Leopold, D. A., & Logothetis, N. K. (1998). Microsaccades differentially modulate neural activity in the striate and extrastriate visual cortex. *Experimental Brain Research*, 123(3), 341–345.
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., & Hubel, D. H. (2000). Microsaccadic eye movements and firing of single cells in the striate cortex of macaque monkeys. *Nature Neuroscience*, 3(3), 251–258.
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., & Hubel, D. H. (2002). The function of bursts of spikes during visual fixation in the awake primate lateral geniculate nucleus and primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(21), 13920–13925.
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., & Hubel, D. H. (2004). The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(3), 229–240.
- Martinez-Conde, S., Macknik, S. L., Troncoso, X. G., & Hubel, D. H. (2009). Microsaccades: A neurophysiological analysis. *Trends in Neurosciences*, 32(9), 463–475.
- Martinez-Conde, S., Otero-Millan, J., & Macknik, S. L. (2013). The impact of microsaccades on vision: Towards a unified theory of saccadic function. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(2), 83–96.
- Masquelier, T., Portelli, G., & Kornprobst, P. (2014). Microsaccades enable efficient synchrony-based visual feature learning and detection. *BMC Neuroscience*, 15(Suppl. 1), 121.
- Mergenthaler, K., & Engbert, R. (2010). Microsaccades are different from saccades in scene perception. *Experimental Brain Research*, 203(4), 753–757.
- Meyberg, S., Werkle-Bergner, M., Sommer, W., & Dimigen, O. (2015). Microsaccade-related brain potentials signal the focus of visuospatial attention. *NeuroImage*, 104(1), 79–88.
- Møller, F., Laursen, M., Tygesen, J., & Sjølie, A. (2002). Binocular quantification and characterization of microsaccades. *Graefes' Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 240(9), 765–770.
- Nyström, M., Hansen, D. W., Andersson, R., & Hooge, I. (2016). Why have microsaccades become larger? Investigating eye deformations and detection algorithms. *Vision Research*, 118, 17–24.
- Otero-Millan, J., Castro, J. L. A., Macknik, S. L., & Martinez-Conde, S. (2014). Unsupervised clustering method to detect microsaccades. *Journal of Vision*, 14(2), 18.
- Rolfs, M. (2009). Microsaccades: Small steps on a long way. *Vision Research*, 49(20), 2415–2441.
- Rucci, M., & Victor, J. D. (2015). The unsteady eye: An information-processing stage, not a bug. *Trends in Neurosciences*, 38(4), 195–206.
- Troncoso, X. G., Macknik, S. L., & Martinez-Conde, S. (2008). Microsaccades counteract perceptual filling-in. *Journal of Vision*, 8(14), 15.
- White, A. L., & Rolfs, M. (in press). Oculomotor inhibition covaries with conscious detection. *Journal of Neurophysiology*.
- Yuval-Greenberg, S., Merriam, E. P., & Heeger, D. J. (2014). Spontaneous microsaccades reflect shifts in covert attention. *The Journal of Neuroscience*, 34(41), 13693–13700.
- Zuber, B. L., Stark, L., & Cook, G. (1965). Microsaccades and the velocity-amplitude relationship for saccadic eye movements. *Science*, 150(3702), 1459–1460.

## Detection methods of microsaccades

ZHANG Yang; LI Aisu; ZHANG Shaojie; ZHANG Ming

(Department of Psychology, Soochow University, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** Eye movement is one of the most fundamental skills for human being to explore the world around us. Microsaccades refer to the involuntarily fast and large eye movements during visual fixation of a stimulus. Over the past 15 years, microsaccades have gradually become one of the hottest fields of vision research. Investigation of microsaccades has relied heavily on successful detection and measurement of the microsaccades. Although during the past half century, microsaccades have received much attention in the fields of psychology, how to detect and measure it robustly and accurately is still an open question. The current paper reviewed the literatures on the algorithm of the microsaccades-detection procedures, and pointed out that the future studies could combine the objective threshold procedure with the multiple-indexes analysis to further optimize and improve the detection procedure of microsaccades.

**Key words:** detection of microsaccades; experience-dependent method; unsupervised method; multiple-indexes analysis