

团 体 标 准

T/ISC XXX—XXXX

AI 眼镜眼动追踪性能测试方法

The Measurement Metrology of Eye Tracking Performance in AI Glasses

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利与支持性文件一并附上。

（征求意见稿）

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中 国 互 联 网 协 会 发 布

目 次

前言 III

引言 V

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 符号和缩略语 2

5 XXXX 错误！未定义书签。

 5.1 XXXX 错误！未定义书签。

附录 A （规范性） XXXX 错误！未定义书签。

 A.1 XXXX 错误！未定义书签。

 A.1.1 XXXX 错误！未定义书签。

附录 B （资料性） XXXX 错误！未定义书签。

 B.1 XXXX 错误！未定义书签。

 B.1.1 XXXX 错误！未定义书签。

参考文献 错误！未定义书签。

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是T/CIITA x《……》第i部分。T/CIITA x已经发布了以下部分：

——第1部分：……；

——……；

——第n部分：……。

本文件替代T/CIITA x.i《……》，与T/CIITA x.i相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

a)

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国互联网协会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——

引 言

XXXX XXXX

1 概述

眼动追踪技术通过采集用户眼球运动信息，获取用户视线方向、注视位置及眼动行为状态，是实现自然交互和智能感知的重要技术能力。随着人工智能技术在智能终端领域的发展，AI眼镜逐渐由传统的信息显示设备向具备环境感知、用户理解和主动服务能力的智能终端演进，眼动追踪成为支持注视交互、用户意图理解、多模态融合感知以及个性化服务的重要输入能力。高准确度、低延迟、高更新频率的眼动追踪能力，有助于提升AI眼镜在人机交互、智能辅助、空间计算和多模态人工智能应用中的可靠性。因此，眼动追踪性能评价不仅关注硬件传感能力，也关注系统级输出效果，需要通过统一测试方法对准确度、实时性和稳定性进行综合评价。

AI眼镜中的眼动追踪系统通常由红外光源、红外摄像模组、图像处理算法以及视线估计算法组成，其性能直接影响用户交互体验和智能功能可靠性。其中：

a) 眼动追踪视线方向准确度用于评价系统获取用户注视方向和注视目标位置的能力，是实现精准注视交互、目标选择和意图理解的基础性能指标；

b) 眼动追踪延迟用于评价从用户眼球运动到系统输出有效视线信息或产生显示响应之间的时间差，直接影响交互实时性和自然交互体验；

c) 眼动数据更新频率用于评价眼动系统连续输出眼动数据的能力，是影响快速眼动任务识别和动态交互的重要指标；

d) 眼动追踪既定轨迹综合性能用于评价系统在连续运动场景下对用户视线变化过程的跟踪能力，可用于评价复杂交互任务中的稳定性。

本文件围绕上述四类性能指标，规定AI眼镜眼动追踪性能测试方法，包括测试环境、测试设备、测试流程、数据处理及性能评价方法，为AI眼镜眼动产品研发验证、质量评价和第三方检测提供统一测试依据。

眼动追踪性能不仅影响客观系统能力，也会影响用户主观使用体验。例如，较低的视线方向准确度可能导致注视交互误触发；较大的系统延迟可能降低交互自然性；较低的数据更新频率可能影响连续操作流畅性。本文件主要针对眼动追踪客观性能进行测试评价，为后续结合用户体验、人因评价等方法开展综合评价提供基础。

2 范围

本文件规定了眼动追踪的术语定义、AI眼镜眼动追踪性能的测试方法。

本文件适用于指导眼动追踪设备的性能检测。

3 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 33767.6 信息技术 生物特征样本质量 第 6 部分：虹膜图像数据

GB/T 38259 信息技术 虚拟现实头戴式显示设备通用规范

GB/T 6379.1-2004 测量方法与结果的准确度（正确度与精密度） 第 1 部分：总则与定义

GB/T41265-2022 可穿戴设备的光辐射安全要求

GB/T42750-2023 可穿戴设备的光辐射安全测量方法

IEC 63145-20-10 眼戴显示-第 20-10 部分：基础测量方法-光学特性（Eyewear display - Part 20-10: Fundamental measurement methods – Optical properties）

IECTR62471-4:2022 灯具和灯管系统的光生物安全-第四部分：测量方法（Photobiological safety of lamps and lamp systems-Part 4: Measuring methods）

4 术语和定义

引用文件界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

4.1 适眼距 eye relief

眼睛角膜顶点到近眼显示设备距离人眼最近的光学表面之间的距离。

注：对于光轴与光学平面带倾角的近眼显示设备，适眼距为角膜顶点到近眼显示设备沿光轴方向距离人眼最近的光学表面之间的距离。

[来源：IEC 63145-20-10:2019]

4.2 眼点 eye point

可以获得近眼显示设备最优显示性能时，眼睛的瞳孔所在的位置。

注：眼点的位置一般位于近眼显示设备出瞳的中心。

[来源：IEC 63145-20-10:2019]

4.3 视场角 field of view

头戴式设备所形成的图像中，人眼可观察到的图像边缘与观察点（人眼瞳孔中心）连线的夹角。

注：视场角包括水平视场角、垂直视场角、对角线视场角。

[来源：GB/T 38259-2019，有修改]

4.4 视轴 visual axis

从视网膜中央凹区域到注视点之间的直线，如图3.1所示。

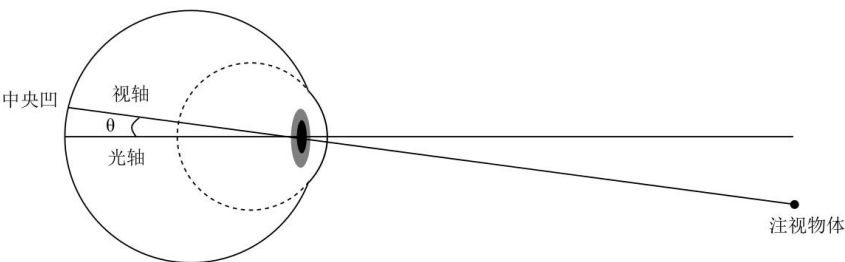


图 3.1 光轴、视轴与 Kappa 角

4.5 光轴 optical axis

经过瞳孔中心与眼球中心且垂直眼角膜前表面的直线，如图3.1所示。

4.6 Kappa 角 Kappa angle

视轴与光轴之间的空间夹角 θ ， θ 为锐角，如图3.1所示。

4.7 单目视线方向 monocular gaze direction

从视网膜中央凹区域到被注视物体的射线方向，即为视轴方向，可使用三维向量表示。如图 3.2 所示， $\vec{P}_L$ 和 $\vec{P}_R$ 分别为左目视线方向和右目视线方向。

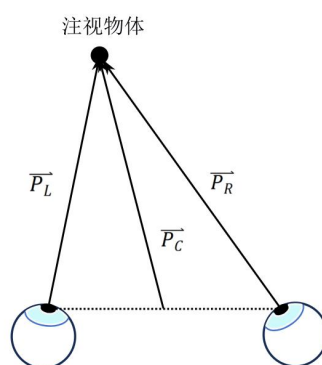


图 3.2 视线方向

4.8 双目视线方向 binocular gaze direction

双目瞳孔中心连线的中点位置到注视目标物体的射线方向。如图 3.2 所示， $\vec{P}_C$ 为双目视线方向，此方向也为左目视线方向 $\vec{P}_L$ 和右目视线方向 $\vec{P}_R$ 的向量和的一半， $\vec{P}_C = (\vec{P}_L + \vec{P}_R)/2$ 。

4.9 内旋 intrinsic rotation

围绕物体上的坐标系XYZ轴进行旋转。

4.10 眼动追踪器延迟 eye tracking delay

自眼球转动到某一位置起，到眼动追踪器反馈该位置有效视线方向的延迟。

4.11 端到端延迟 end to end latency

自眼球转动到某一位置起，到近眼显示设备内有效光信号被观察到的延迟。

4.12 眼动数据更新频率 eye tracking data update frequency

眼动追踪系统每秒输出眼动数据的次数，以赫兹（Hz）为单位

4.13 轨迹绝对误差 absolute trajectory error

眼动追踪系统输出的注视点轨迹与真值轨迹对应位置的平移差异。

5 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

ER 适眼距 (Eye Relief)

FOV 视场角 (Field of View)

IPD 入瞳距离 (Inter-Pupillary Distance)

DUT 待测设备 (Device Under Test)

SD 标准差 (Standard Deviation)

RMS 均方根 (Root Mean Square)

PD 光电二极管 (Photodiode)

6 通用测试要求

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

6.1 测试条件

6.1.1 测试环境

测试环境温度应保持在 22℃-28℃，相对湿度应保持在 25%-70% 的范围内，气压应保持在 86kPa-106kPa 的范围内，环境光的亮度应处在 100lux-700lux 之间，DUT 与眼球之间应有遮光罩遮挡外部环境光。

6.1.2 DUT 电源

为确保 DUT 的性能稳定，DUT 的驱动电源应当调至 DUT 的标称供电参数。如测试过程 DUT 为电池供电，则应确保测试过程中电量不少于满量程的 50%。

6.1.3 光辐射安全

在进行眼动追踪视线方向准确度测试前，应按照 GB/T42750-2023 与 IEC62471-4:2022 中提供的方法，对 DUT 中光辐射照度与亮度进行测量，确保满足 GB/T41265-2022 中 7.2.2 节豁免类要求。除特殊说明外，本文中所有眼动追踪相关测试都应满足光辐射安全要求。

6.2 测试设备

眼动追踪性能测试设备包括真实人眼测试设备、高精度人工眼模拟设备、光电二极管、编码器、眼电图采集设备。其中，真实人眼可用于评价实际佩戴状态下的眼动追踪性能。高精度人工眼模拟设备用于提供稳定、可重复的视线方向真值，推荐用于准确度、轨迹及延迟等需要确定参考值的测试。

6.2.1 真实人眼

可以使用测试人员的真实人眼进行测试，真实人眼应无任何眼科疾病，如失明、色盲、白内障、弱视、青光眼等；测试人员的年龄应在13-60岁之间，若佩戴视力矫正设备需在测试报告中注明。

6.2.2 高精度人眼模拟设备

高精度人眼模拟设备是模拟真实人眼及其运动的一套装置，主要由两部分组成，分别是人工眼和多轴人工眼控制装置。该装置应可以模拟人眼注视目标物体时的视线方向，针对不同人眼的差异性，可以设置不同的 Kappa 角，还可以对人眼的运动轨迹进行模拟，详细的介绍参考附录 A.1 和 A.3。

6.2.2.1 人工眼

人工眼装置以真实人眼的结构以及光学特性为基础，从眼球尺寸、角膜、瞳孔等人眼结构，进行了详细的模拟，人工眼具体模拟参数应参照表 5.1，详细参数解释见附录 A.2。

表 6.2 人工眼结构建议参数

参数	数值
角膜曲率半径	7.7~7.8mm
角膜横径/竖径	10.05~11.04mm
眼球直径	~24mm
瞳孔直径	2.5~4mm
前房轴深	3.0~3.5mm

注 1：人工眼应以真实人眼结构参数为准，真实人眼的结构参数值来源于《中华眼科学》(第三版)李凤鸣 谢立信。

注 2：人工眼球内部可以安装微型相机（可选）。

6.2.2.2 多轴人工眼控制装置

该装置应实现左右人工眼转动的精确控制，如图 5.1 中人工眼转动的俯仰角与方位角，转动角度的精度应不低于 0.01°；以人工眼正视前方为基准，俯仰角与方位角转动的范围应不小于-45° ~45°，对应水平 FOV 和垂直 FOV 大小为 90°；人工眼最大转动速度应不小于 700° /s。人工眼控制装置还应可以控制人工眼的 IPD 大小，精度不低于 0.01mm。

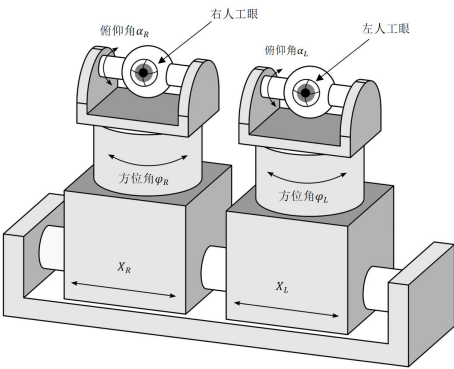


图 6.2 高精度人眼模拟设备

6.2.3 光电二极管

光电二极管是一种半导体器件，能够将光信号转换为电信号。选用的 PD 应灵敏度高，响应速度快，通常在纳秒级别，PD 结合信号放大器应将检测到的电信号进行放大。PD 用以获取 DUT 出射的光信号强度，经转化后得到电信号随时间变化的数据。

6.2.4 编码器

编码器是一种传感器装置，能够将物体的机械位置转换成电信号，这些电信号随后可以被处理以确定该物体的位置、速度或方向。人工眼转动的位置信息可通过编码器获取，即通过编码器实时获取人工眼位置随时间变化的数据。

6.2.5 眼电图

眼电图是一种测量人眼视网膜电位的技术，应在人眼球附近位置放置一对电极，人眼朝左侧或右侧运动时，会在电极间产生相应的电位差。眼电图用以获取真实人眼转动的位置信息，即获取电位差信号随时间变化的数据。

6.3 测试重复性要求

为保证测试结果可重复，应满足以下要求：

- a) 测试前应完成 AI 眼镜设备状态检查，包括设备版本、电量、工作模式以及眼动校准状态；
- b) 测试过程中，应保持 AI 眼镜佩戴位置、眼点位置、适眼距（ER）以及瞳距（IPD）设置一致；
- c) 采用真实人眼测试时，应记录测试人员基本信息，包括年龄、视力状态以及是否佩戴视力矫正设备；
- d) 采用人工眼测试时，应记录人工眼结构参数、运动控制参数以及视线方向真值；
- e) 测试数据应包含时间戳、设备状态、测试条件以及原始输出数据，保证测试结果可追溯。

7 眼动追踪视线方向准确度的测试方法

7.1 测试条件

应按照6.1节内容进行相应的执行。

7.2 测试设备

测试设备包括真实人眼测试设备、高精度人工眼模拟设备，应按照6.2节内容进行相应的执行。

7.3 坐标系定义

7.3.1 眼球局部坐标系

眼球旋转局部坐标系如图 7.3.1 所示，以眼球中心为原点 O ，采用右手系， Z 轴方向为眼球视轴方向，绕 X 轴旋转角 α （称为“俯仰角”），绕 Y 轴旋转角 φ （称为“方位角”）。

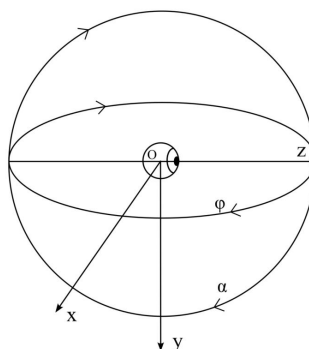


图7.3.1 眼球局部坐标系

7.3.2 测试坐标系

眼动追踪测试全局测试坐标系如图 7.3.2 所示，具有直角坐标系和球坐标系，其中坐标系原点 O 设定在左右眼球中心连线的中点处，采用右手坐标系，眼睛注视正前方的方向为 Z 轴正方向。

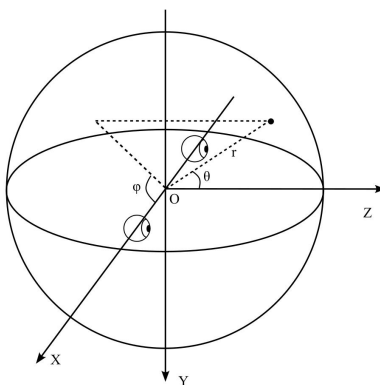


图7.3.2 测试坐标系

7.4 测试目标点位

测试坐标系参照 7.3.2，测试目标点位的球坐标为 (r, θ, φ) ，相应的直角坐标为 (x, y, z) 。测试目标点位的球坐标可以通过下式转换为直角坐标：

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

如图 7.4 中所示，所有测试目标点位于同一平面内，该平面垂直 Z 轴且与原点 O 相距 5m 。测试目标点位共 37 个，其中 1 个目标测试点位于极性角 $\theta = 0^\circ$ 处，12 个目标测试点位于极性角 $\theta = 20^\circ$ 处，并且在方位角 φ 每隔 30° 的方向上均匀分布。除此之外，目标测试点位还包括 $\theta = 10^\circ / 30^\circ$ 处的各 12 个（图中未画出）。本标准中对所有所有测试目标点进行了定义，如果涉及到定义之外的测试点，需要在测试报告中说明。

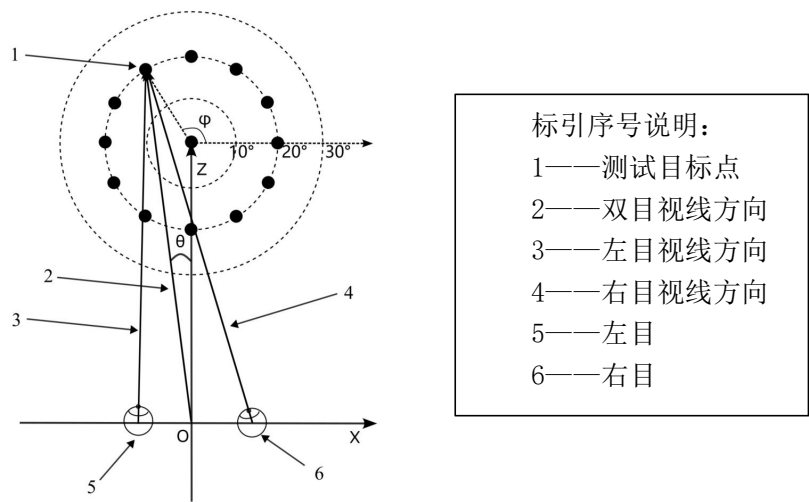


图7.4 测试目标点位

7.5 测试流程

如图7.5所示，为眼动追踪视线方向准确度测试简要示意图，包含了双目眼球以及DUT，图中省略了控制眼球转动和控制DUT位姿的装置，除特殊说明外，本标准中所有测试装置示意图都省略该装置。

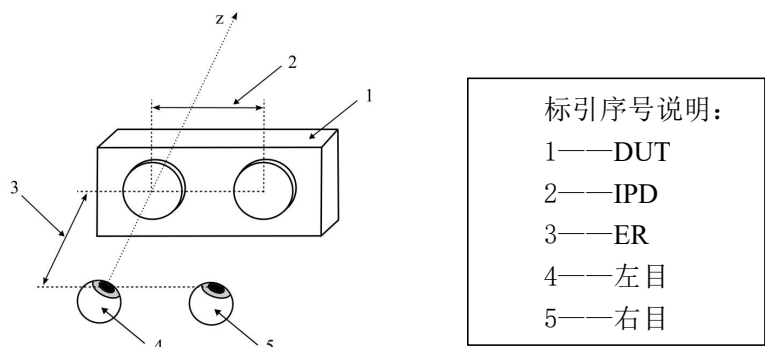


图7.5 视线方向准确度测试示意图

眼动追踪视线方向准确度测试主要步骤如下：

步骤1：调节DUT光机的IPD与测试设备双目的IPD一致，调节DUT光机与测试设备的距离至合适的ER，使左右眼球瞳孔中心分别位于DUT光机眼点处，如图7.5所示。

步骤2：进入DUT眼动追踪校准程序，若人工眼中安装有相机，通过算法处理使人工眼与真实人眼行为基本类似，依次注视每一个校准点直到眼动追踪校准成功。若人工眼中无相机，需获取注视每个校准点对应的角度值（附录A.4），多轴人工眼控制装置按照此角度值转动人工眼，依次对准每一个校准点直到所有校准点完成校准。

步骤3：DUT中屏幕依次显示测试图卡（附录A.5），其中黑色圆点位置为7.4节中定义的目标测试点位。在每张测试图卡中，使眼球按照方位角 φ 从小到大的顺序，依次注视每一个目标测试点位，并停留一段时间用于收集所需眼动追踪数据。

步骤4：测试全程应保存眼动追踪相关数据，保存的数据类型参考附录A.6节。

注 1：测试图卡可以使用测试软件替代，通过测试软件实现在 DUT 屏幕中显示目标测试点，其位置应为 7.4 节中已定义的测试目标点位。

注 2：当使用人工眼测试时，可不使用测试图卡，使人工眼按照已定义的测试目标点位对应的方向进行转动即可。

注 3：本节中眼动追踪测试时眼动追踪器和眼球的位置关系在测试与校准时一致，如测试时位置关系相对校准时发生变化，可参考附录 A.8 节。

使用真实人眼进行眼动追踪视线方向准确度测试时，由于真实人眼在注视目标点时会伴随微眼跳，并不是一个稳定的系统，在 7.6 节中真实人眼视线方向的真值是固定的，因此在眼动追踪视线方向准确度评估时会产生误差。人工眼的转动完全是由控制系统进行控制，是一个完全稳定且已知真值的系统，视线方向真值可设置。建议使用人工眼进行眼动追踪视线方向准确度测试，可以避免上述使用真实人眼测试时产生的问题，详细内容参考附录 A.9 节。

7.6 眼动追踪视线方向准确度评估

根据 GB/T 6379.1-2004，眼动追踪视线方向准确度用于评价 AI 眼镜眼动追踪系统输出视线方向与实际视线方向之间的一致程度，包括正确度和精密度两个指标。

7.6.1 正确度

正确度表示眼动追踪系统多次测试结果平均值与视线方向真值之间的一致程度，用于评价系统输出结果的系统偏差。

正确度采用测试样本视线方向与真值之间夹角偏差的平均值表示，其计算值越小，表示眼动追踪系统输出视线方向与真实视线方向越接近。使用真实人眼测试中，根据 7.3.2 节中测试坐标系定义，测试目标点的直角坐标为 (x, y, z) ，则双目视线方向的真值为 $\vec{P}_C = (x, y, z)$ ，左目和右目视线方向的真值分别为：

$$\vec{P}_L = (x - IPD/2, y, z) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\vec{P}_R = (x + IPD/2, y, z) \quad \dots\dots\dots(3)$$

其中 IPD 为人眼双目瞳距。

使用人工眼测试中，人工眼实际的转动角度转换为注视方向，并作为真值。参考 7.3.1 节坐标系，以左人工眼为例，初始状态视轴方向与坐标系 Z 轴平行，眼球注视测试目标点位 (x, y, z) 时的俯仰角与方位角分别为 α_L 和 φ_L ，人工眼以内旋的方式先旋转方位角再旋转俯仰角，则左人工眼的视线方向真值为：

$$\vec{P}_L = (\tan \varphi_L, \tan \alpha_L \cdot \cos^{-1} \varphi_L, 1) \quad \dots\dots\dots(4)$$

同理右人工眼的视线方向真值为：

$$\vec{P}_R = (\tan \varphi_R, \tan \alpha_R \cdot \cos^{-1} \varphi_R, 1) \quad \dots\dots\dots(5)$$

人工眼双目视线方向真值为：

$$\vec{P}_C = (\vec{P}_L + \vec{P}_R)/2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

DUT 中眼动追踪算法反馈的所有数据为测试数据，在得到有效测试值前，应需对原始数据进行初步处理（附录 A.7）。视线方向的真值 $\overrightarrow{P_{k_real}^e}$ 与测试值 $\overrightarrow{P_{k_i}^e}$ 之间的向量夹角 $\theta_{k_i}^e$ 为测试样本数据的偏差， $\theta_{k_i}^e$ 可由下式计算：

$$\theta_{k_i}^e = \arccos \frac{\overrightarrow{P_{k_real}^e} \cdot \overrightarrow{P_{k_i}^e}}{|\overrightarrow{P_{k_real}^e}| |\overrightarrow{P_{k_i}^e}|} \dots\dots\dots(7)$$

其中，

—— $e = L, R, C$ 表示左目、右目、双目视线方向；

—— $k = 1, 2, 3 \dots 37$ 表示为对应的测试目标点位；

—— $i = 1, 2, 3, 4, 5 \dots N$ 表示为对应的测试样本数据。

$\theta_{k_i}^e$ 始终大于等于零，任一测试目标点位眼动追踪视线方向的正确度可以表示为：所有 $\theta_{k_i}^e$ 的平均值 $\overline{\theta_k^e}$ ，参照值为零， $\overline{\theta_k^e}$ 越小表示正确度越高。

$$\overline{\theta_k^e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{k_i}^e \dots\dots\dots(8)$$

7.6.2 精密度

精密度表示在相同测试条件下，多次测试结果之间的一致程度，用于评价眼动追踪系统输出结果的稳定性。

精密度采用测试样本视线方向偏差的标准差（SD）或均方根（RMS）表示，其计算值越小，表示系统输出稳定性越高。对应测试目标点位的眼动追踪视线方向的精密度应使用标准差或均方根来表示，

其中 SD 可由 $\theta_{k_i}^e$ 计算得到，如下：

$$\sigma_k^e = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_{k_i}^e - \overline{\theta_k^e})^2} \dots\dots\dots(9)$$

眼动追踪视线方向连续测试样本数据 $\overrightarrow{P_{k_i}^e}$ 与 $\overrightarrow{P_{k_i+1}^e}$ 之间的夹角为 $\alpha_{k_i}^e$ ，则 RMS 可由下式计算：

$$RMS_k^e = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_{k_i}^e{}^2} \dots\dots\dots(10)$$

SD 侧重于衡量所有测试样本数据的整体精密度，RMS 侧重于衡量连续测试样本数据的精密度，SD 和 RMS 的计算值越小，表示对应测试目标点位的眼动追踪视线方向的精密度越高。

相同极性角 θ 对应相同的 FOV，描述相同 FOV 下的视线方向正确度应表示为所有测试目标点

位的 $\overline{\theta}_k^e$ 的平均值:

$$\overline{\overline{\theta}_k^e} = \frac{1}{n} \sum \overline{\theta}_k^e \quad \dots\dots\dots(11)$$

其中 n 为对应 FOV 下目标测试点位的数量, $\overline{\theta}_k^e$ 为第 k 个目标测试点位的正确度大小。

同样的, 精密度也应表示为此 FOV 下所有测试目标点的 SD 和 RMS 的平均值。

$$\overline{\sigma}_k^e = \frac{1}{n} \sum \sigma_k^e \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\overline{RMS}_k^e = \frac{1}{n} \sum RMS_k^e \quad \dots\dots\dots(13)$$

对于眼动追踪视线方向整体的准确度应使用37个测试目标点位的正确度与精密度的均值表示, 即公式 (11)、公式 (12) 和公式 (13) 中的 $n=37$ 。

8 眼动追踪延迟的测试方法

8.1 测试条件

应按照6.1节内容进行相应的执行。

8.2 测试设备

测试设备包括真实人眼测试设备、高精度人工眼模拟设备、光电二极管、编码器、眼电图采集设备, 应按照6.2节内容进行相应的执行。

8.3 测试流程

如图8.1所示, 为眼动追踪延迟测试的简要装置示意图, 包含了双目眼球、DUT和PD, 省略了获取双目转动信息的编码器或眼电图装置。

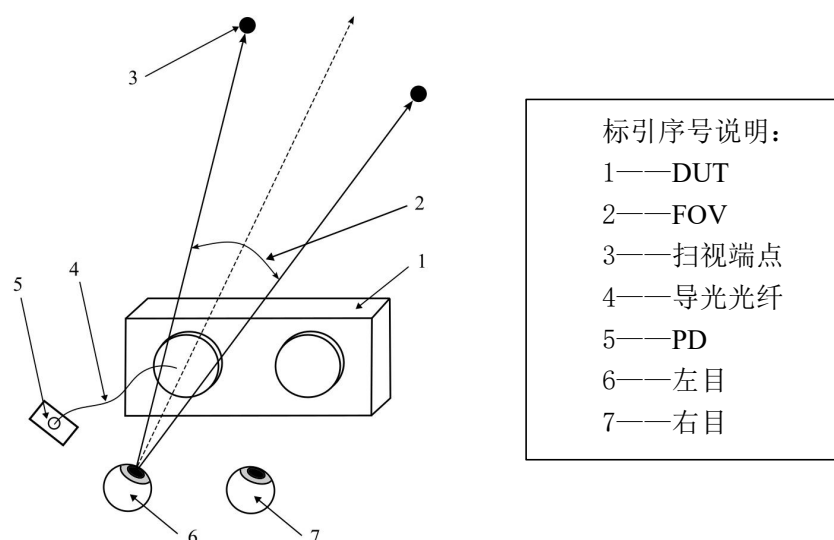


图8.1 延迟测试示意图

眼动追踪延迟测试应有如下的测试步骤：

步骤1-2：参考7.5节中步骤1-2。

步骤3：如图6.1所示，双目在水平方向来回扫视，扫视的FOV应不小于20°，两个扫视端点应对称分布在左目正视（FOV=0°）两侧。获取眼动追踪视线方向数据，并在该视线方向水平FOV<0°时控制DUT屏幕显示全黑画面，水平FOV≥0°时控制屏幕显示全白画面，使用导光光纤将DUT屏幕光导入到PD接收器。

步骤4：

- 1) 使用真实人眼测试中，通过分析眼电图电位差变化得到左目转动到正视时的时间戳 T_{Eye} ；
- 2) 使用人工眼测试中，通过编码器获取左目转动到正视时的时间戳信息 T_{Eye} ；
- 3) 保存PD信号出现上升沿或下降沿时的时间戳 T_{End} ；
- 4) 获取左目眼动追踪视线方向数据并处理，判断水平FOV<0°到水平FOV>0°变化时的时间戳并保存 T_{ET} 。

步骤5：眼球在垂直方向扫视参考步骤3，对应选择垂直FOV，重复步骤4。

8.4 眼动追踪延迟评估

8.4.1 眼动追踪器延迟

定义从眼球转动到某个固定位置的时刻到DUT反馈有效数据时刻的差值，前者为步骤4中真实人眼（或人工眼）转动到正视时的时间戳 T_{Eye} ，后者为步骤4中眼动追踪视线方向数据经处理后得到的时间戳 T_{ET} ，则眼动追踪器的延迟 L_{ET} 被计算为：

$$\text{Eye tracking delay} = T_{ET} - T_{Eye} \text{ (ms)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

8.4.2 端到端延迟

定义从眼球转动到某个固定位置的时刻到PD接收到光信号转为电信号的上升沿或下降沿的中间时刻的差值，此延迟除了包含了眼动追踪器延迟之外，还包含DUT中屏幕刷新所需的时间，取决于凝视点图像渲染、屏幕刷新率、显示硬件等因素。

PD接收到DUT屏幕亮暗变化引起的电压信号的上升沿或下降沿中间时间戳为 T_{End} ，则端到端的延迟 L_{End} 被计算为：

$$\text{End to end latency} = T_{End} - T_{Eye} \text{ (ms)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

眼动追踪延迟测试过程中，双目在两个扫视端点之间来回进行水平扫视，往返一个来回可以得到2个延迟有效数据，眼球往返扫视N次，则可以获得2N个延迟数据。

通过公式（14）和公式（15）可以分别得到眼动追踪器延迟和端到端延迟 L_{ET} ， L_{End} ；则可计算眼动追踪器平均延迟和端到端平均延迟分别为：

$$\overline{L_{ET}} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} L_{ET-i} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$\overline{L_{End}} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} L_{End_i} \dots\dots\dots(17)$$

标准差分别为：

$$\sigma_{ET} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} (L_{ET_i} - \overline{L_{ET}})^2} \dots\dots\dots(18)$$

$$\sigma_{End} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{2N} (L_{End_i} - \overline{L_{End}})^2} \dots\dots\dots(19)$$

$\overline{L_{ET}}$ 和 $\overline{L_{End}}$ 值越小表示眼动追踪器延迟和端到端延迟越低， σ_{ET} 和 σ_{End} 值越小描述了眼动追踪延迟测试的重复性越高。

9 眼动数据更新频率的测试方法

9.1 测试条件

应按照6.1节内容进行相应的执行。

9.2 测试设备

测试设备包括真实人眼测试设备、高精度人工眼模拟设备，应按照6.2节内容进行相应的执行。

注：本章节需要在注视（fixation）、平稳追踪（smooth pursuit）、高速扫视（saccade）三类典型眼动任务中测试眼动数据更新频率，使用真实人眼不利于准确控制眼动速度，且易因眨眼或头部晃动等因素影响眼动追踪器的输出，建议使用 6.2.2 中高精度人眼模拟设备。

9.3 测试流程

步骤1-2：参考7.5节中步骤1-2。

步骤3：双目在眼动追踪器有效FOV最大范围进行典型的眼动任务（注视、平稳追踪、高速扫视），保存眼动追踪器输出数据的时间戳。如图 9.1所示，假设虚线圆环为有效FOV边界，1-8为边界上均匀分布的采样点，

1) 依次注视1-8每个点位，每个点位注视时间不少于5秒钟，保存注视每个点位时眼动追踪器输出所有眼动数据的时间戳 $T_{fixation}$ ，

2) 依次在（1，5）、（3，7）、（2，6）、（4，8）四个点对进行来回平稳追踪扫视（使用人眼模拟设备时速度控制在30度/秒，使用真实人眼时，需要按30度/秒的速度移动黑点进行引导），每个点对扫视次数不少于10次，保存扫视每组点对时眼动追踪器输出的所有眼动数据的时间戳

$T_{smoothpursuit}$ ，

3) 依次在（1，5）、（3，7）、（2，6）、（4，8）四个点对进行来回高速扫视，（使用人眼模拟设备时速度控制在500度/秒，使用真实人眼时，需提前训练按照接近的速度完成扫视），每个点对扫视次数不少于10次，保存扫视每组点对时眼动追踪器输出的所有眼动数据的时间戳 $T_{saccade}$ 。

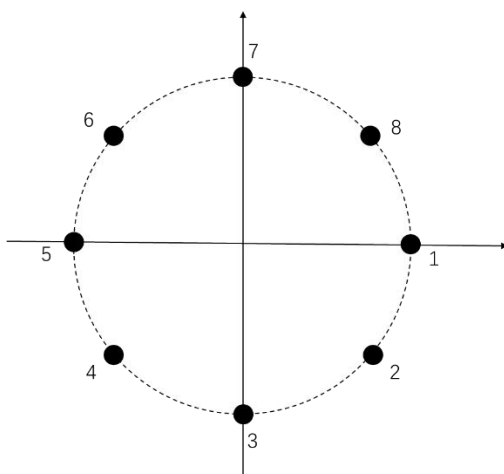


图 9.1 眼动数据更新频率测试目标点位

9.4 眼动数据更新频率评估

分别在注视、平稳追踪、高速扫视三类典型眼动任务中，根据输出的眼动数据时间戳，计算相邻数据点的时间差 Δt ，统计其平均值 Δt_{avg} ，进而得到各类任务下眼动数据更新频率。

$$\Delta t_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i}{N}$$

$$data\ frequency = \frac{1}{\Delta t_{avg}}$$

最终，计算三类眼动任务下眼动数据更新频率的平均值，得到最终眼动追踪器的数据更新频率。进一步，可以根据各类眼动任务下相邻数据点的时间差 Δt 的标准差 Δt_{std} 作为眼动数据更新稳定性参考，其值越小，表示眼动数据更新频率越稳定。

$$\Delta t_{std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta t_i - \Delta t_{avg})^2}{N}}$$

10 眼动追踪既定轨迹的综合测试方法

10.1 测试条件

应按照6.1节内容进行相应的执行。

10.2 测试设备

测试设备包括真实人眼测试设备、高精度人工眼模拟设备、光电二极管、编码器、眼电图采集设备，应按照6.2节内容进行相应的执行。

注：本章节测试中使用真实人眼较难获取注视点随时间变化的轨迹真值，应使用6.2.2中高精度人眼模拟设备。

10.3 眼动追踪注视点轨迹贴合度测试方法

10.3.1 测试流程

主要步骤如下：

步骤1-2：参考7.5节中步骤1-2。

步骤3：使人工眼按照设定的注视点轨迹进行转动，得到注视点轨迹的真值。

步骤4：参考7.5节步骤4，获取眼动追踪数据分析得到注视点运动轨迹的测试值。

10.3.2 眼动追踪注视点轨迹贴合度评估

已设定的注视点运动轨迹真值为 Tr_{real} ，测试值为 Tr_{test} ， r_i 和 t_i 分别为真值轨迹与测试轨迹上的第*i*个对应点位置， r_i 和 t_i 坐标需要按照5.3.2节测试坐标系对齐。则眼动追踪注视点轨迹绝对误差的均方根值可通过下式计算：

$$RMS_{ATE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ||t_i - r_i||^2} \quad \dots\dots\dots(20)$$

式中， RMS_{ATE} 为眼动追踪注视点轨迹的绝对误差均方根值， $|t_i - r_i|$ 为测试轨迹与真值轨迹上第*i*个对应点之间的距离， RMS_{ATE} 的计算值越小表示眼动追踪注视点轨迹贴合度越高。

10.4 眼动追踪注视点轨迹的延迟测试方法

10.4.1 测试流程

主要步骤如下：

步骤1-2：参考7.5节中步骤1-2。

步骤3：使人工眼按照设定的注视点轨迹进行转动，得到注视点轨迹的真值。

步骤4：选取运动轨迹中*n*个位置，获取并分析眼动追踪视线方向数据，DUT屏幕初始显示全黑，当该视线方向在第1个位置时控制DUT屏幕显示全白，在第2个位置时显示全黑，在第3个位置时显示全白，依次类推，并使用导光光纤将DUT屏幕发光导入PD接收器。

步骤5：

- 1) 通过编码器获取人工眼运动到第*i*个位置的时间戳信息 T_{Eye}^i ;
- 2) 保存PD信号出现上升沿或下降沿时的时间戳 T_{End}^i ;
- 3) 获取眼动追踪数据并处理，判断注视点轨迹运动到第*i*个位置的时间戳并保存 T_{ET}^i 。

10.4.2 眼动追踪注视点轨迹的延迟评估

注视点轨迹上第*i*个位置的眼动追踪器延迟 L_{ET}^i 和端到端延迟 L_{End}^i 分别由公式(21)和公式(22)计算：

$$L_{ET}^i = T_{ET}^i - T_{Eye}^i \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$L_{End}^i = T_{End}^i - T_{Eye}^i \quad \dots\dots\dots(22)$$

式中, T_{Eye}^i 为步骤 5 中人工眼运动到第 i 个位置的时间戳, T_{ET}^i 为步骤 5 中眼动追踪视线方向数据经处理后得到的时间戳, T_{End}^i 为步骤 5 中 PD 信号出现上升沿或下降沿时的时间戳。

注视点轨迹的整体延迟应为轨迹上所有点位置的延迟平均值,则注视点轨迹的眼动追踪器延迟和端到端延迟分别为:

$$Tr_{ET} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{ET}^i \dots\dots\dots(23)$$

$$Tr_{End} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{End}^i \dots\dots\dots(24)$$

式中, Tr_{ET} 和 Tr_{End} 分别为注视点轨迹的眼动追踪器延迟和端到端延迟。

Tr_{ET} 和 Tr_{End} 的计算值越小则表示注视点轨迹的眼动追踪器延迟和端到端延迟越低。

附录 A

(资料性)

高精度人眼模拟设备及其相关测试

A.1 高精度的机械运动结构

(一) 水平和竖直运动范围

眼球正视前方的状态下，眼球球心到瞳孔连线为基准轴。当机械结构所模拟的人眼球运动时，从眼球球心到瞳孔连线与基准轴之间形成的夹角即为其运动范围，水平运动范围应满足 $\pm 45^\circ$ ，竖直运动范围应满足向上旋转 45° ，向下旋转 45° 。

可根据设备的反馈信号得到机械结构的转动角度，再根据设备的设计方法计算出人眼的注视角度。

(二) 最大转动速度

指模拟人眼旋转时的最大转动速度；测量单位为度每秒($^\circ/\text{s}$)，应不小于 $700^\circ/\text{s}$ ，以满足大部分人眼的跳视过程。

(三) 最短加速时间

指模拟人眼从静止开始加速到最大转动速度所需要的时间；测量单位为毫秒(ms)。

(四) 定位精度

人眼模拟设备运动到指定位置时，其实际旋转角度与理论旋转角度之间的差值为定位精度，单位为度($^\circ$)。

采用三坐标测量。三坐标记录当前角度为 α_1 ，旋转 α_2 (理论旋转角度)后，三坐标记录当前角度为 α_3 ， $\alpha_3 - \alpha_1$ 为真实旋转角度，其与理论旋转角度的差值即为模拟人眼定位精度。

(五) 重复定位精度

当模拟人眼设备经过旋转回到同一个位置时，与原始位置的误差为重复定位精度。采用三坐标测量。三坐标记录当前原始位置角度为 α_1 ，经过旋转回到原始位置后，三坐标记录当前角度为 α_2 ，

$\alpha_2 - \alpha_1$ 为重复定位精度。

(六) 回转同心度

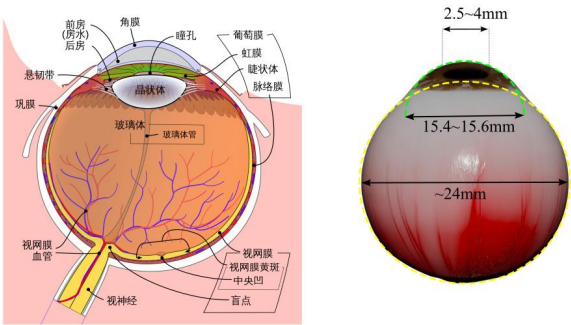
当模拟眼球旋转时，其旋转中心的变化距离；回转同心度的单位为毫米(mm)。

(七) 人眼运动轨迹贴合度

真实人眼运动轨迹与模拟人眼运动轨迹间的贴合度，即对应时间戳下注视点坐标的贴合度。测量单位为百分比(%)。分别获取真实人眼与模拟人眼设备运动的轨迹数据，包含时间戳、注视点坐标信息，计算相同时间戳下坐标信息的误差百分比。

A.2 人眼结构与仿真

如图A.2所示，人眼包含角膜、房水、晶状体、虹膜、瞳孔、巩膜等结构，以人眼结构和光学特性为基准，仿真人眼的特性，得到人工眼的结构参数。



图A.2 人眼结构与人工眼模拟

(一) 角膜曲率半径

人眼角膜是眼球纤维膜最前端透明、稍突出的圆盘状薄膜部分，角膜前表面水平方向和垂直方向的曲率半径分别为 7.8 mm与7.7 mm。曲率半径影响了光线入射到其表面后反射光线的方向，人工眼角膜曲率半径参考值为 7.7 mm至7.8 mm。

(二) 角膜横径/竖径

成年男性角膜横径平均值为 11.04mm，女性为 10.05mm，竖径平均值男性为 10.13mm，女性为 10.08mm。角膜的横径和竖径反映了角膜的尺寸大小，为确保人工眼的角膜贴近真实情况，对应参考值应为 10.05mm~11.04mm。

(三) 眼球直径

眼球近似于球形，后端由视神经连接大脑，眼球前后的直径平均约为 24mm。眼球直径直观反映了其外观效果，人工眼球直径参考值应为~24mm。

(四) 瞳孔直径

瞳孔是眼球血管膜的前部虹膜中心的圆孔，为光线进入眼睛的通道，瞳孔括约肌和放大肌的收缩与松弛可以使瞳孔缩小或放大。正常成人瞳孔直径为 2.5mm~4mm，在暗光和强光环境下为 1.5mm~8mm，考虑人工眼使用环境，其参考值应为 2.5mm 至 4mm。

(五) 前房轴深

前房的前界为角膜内皮，后界为虹膜前表面及晶状体的瞳孔区，正常成人前房轴深约为 3.0mm~3.5mm。前房轴深影响了虹膜和瞳孔的成像以及眼球的结构，人工眼前房轴深参考值应为 3.0mm~3.5mm。

A.3 人眼运动轨迹与模拟

(一) 双眼共轭运动

A.跳视

描述的是当眼球将中央凹区域重新定位到一个新的空间位置时，人眼做出的非常快速的共轭（双眼做相同的事情）眼球运动；它的存在使得我们能够迅速从一个视觉目标跳转到另一个视觉目标。人眼跳视的转动峰值速度约 $700^{\circ}/s$ ，整个跨度时间与转动速度有关，整个过程约在 20~200ms，如图 A.3.1 所示。

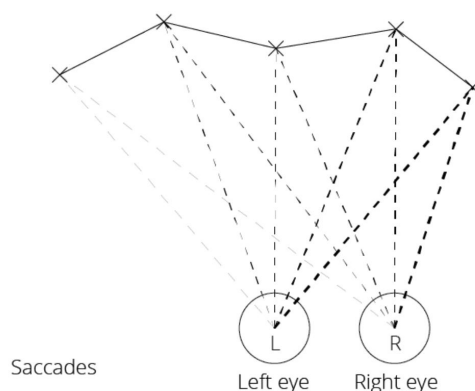


图 A.3.1 人眼跳视示意图

B.凝视

凝视是将中央凹视野在目标上保持一定的时长，以获取足够的视觉图像细节的过程。通常是指目光集中、聚焦并持续看向某一点或某个物体的行为。这种行为可能出现在对某事物的高度关注、集中思考或者深度冥想的过程中。

如图 A.3.2 所示，人眼凝视某一点时，虽然看似静止，实际上眼睛仍然进行着微小的运动，比如震颤、漂移、微动，这些运动是必要的，因为它们可以帮助眼睛避免视觉性衰减。

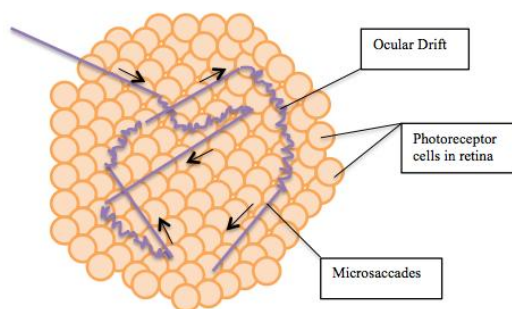


图 A.3.2 人眼凝视示意图

C.扫视

通常是指眼睛迅速地在多个焦点之间移动的行为。这是我们获取视觉信息的主要方式，比如当我们

阅读或者观察周围环境时。在扫视过程中，眼睛会快速地从一個焦點跳轉到另一個焦點，這個過程被稱為掃視。

(二) 双眼聚散运动

A. 前庭眼球反射

前庭眼球反射是一种神经反射机制，其主要功能是在头部移动时稳定视线，以保持对视觉目标的清晰观察。当头部移动时，前庭系统（位于内耳，负责感知头部运动和位置变化）会感知到这种移动，并快速地发送信号到眼球运动的肌肉，产生一个相反方向的眼球运动。这样，即使在头部运动过程中，也能够使视线保持相对静止，聚焦在观察的目标上。

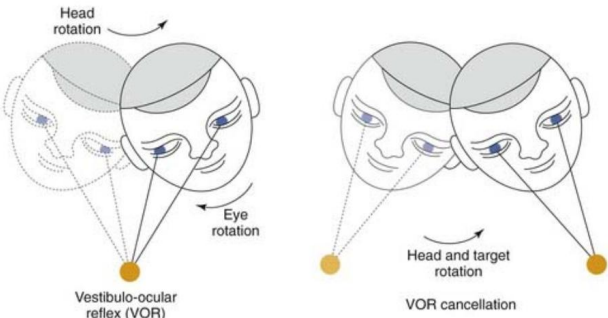


图 A.3.3 前庭眼球反射示意图

B. 辐合眼动

辐合眼动是指两眼向内转动以聚焦于近距离物体的过程。这种眼动是双眼协调工作的一个重要方面，它使得我们能够在观察近处物体时保持视觉的单一性和清晰度。

C. 辐散眼动

辐散眼动是指两眼向外转动的过程，以便于聚焦于远距离的物体。这种眼动与辐合眼动相对，后者涉及两眼向内转动以观察近处的物体。辐散眼动是视觉系统调整焦点以适应不同观察距离的重要机制之一，它使得我们能够在观察远处物体时保持视觉的单一性和清晰度。

A.4 人工眼眼动追踪校准

（一） 人工眼球内无相机

进行5.5节中步骤2眼动追踪校准前，应先获取对应每一个校准点人工眼需转动的角度信息。提供如下的方法：

A. 六轴测角系统获取校准点的眼球转动角度：

操作1：六轴测角系统与DUT光机相对位置调节，使六轴测角系统的相机入瞳位置为DUT光机眼点位置，DUT屏幕中心内容处于六轴测角系统相机拍摄图像中心；

操作2：转动六轴测角系统上的相机，使相机拍摄到的校准点处于相机图像中心位置；

操作3：读取相机转动角度值并记录；

操作4：相机旋转角度回到原点，即DUT光机眼点位置，重复操作2-3测试下一个校准点，直到获取所有校准点转动角度信息。

（二） 人工眼球内有相机

人工眼装置中安装有微型摄像机，摄像机拍摄眼动追踪校准程序显示内容，应准确识别画面中校准点的位置信息，通过算法处理，人工眼自主转动去注视每个校准点，实现自反馈眼动追踪校准功能，此方法与真人眼球校准过程类似。

A.5 测试图卡

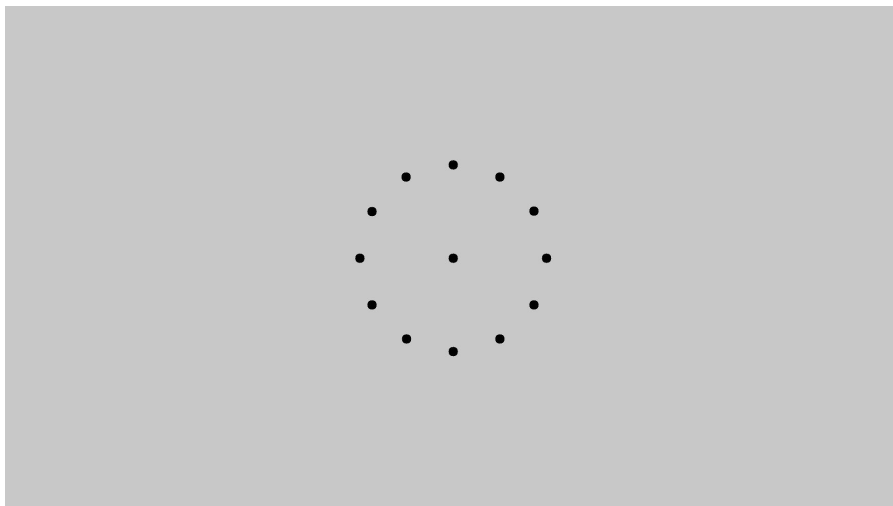


图 A.5.1 目标测试点位 $FOV=0^\circ$ ($\theta=0^\circ$) $FOV=20^\circ$ ($\theta=10^\circ$)

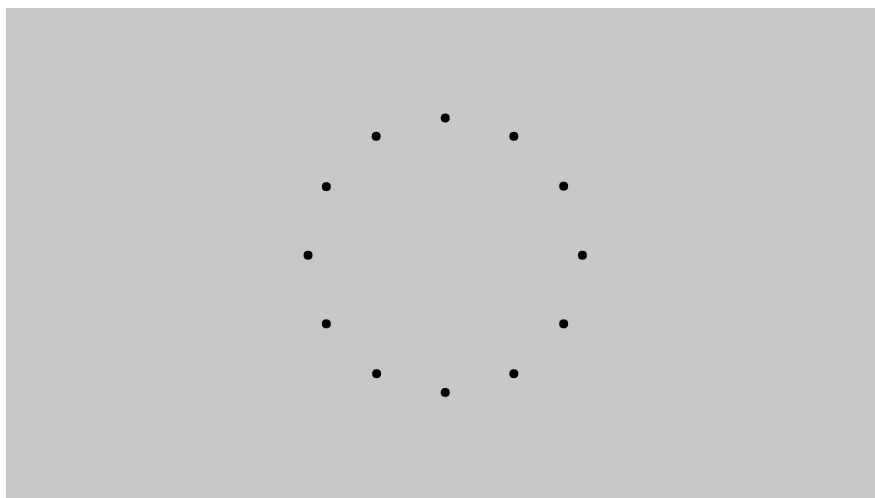


图 A.5.2 目标测试点位 $FOV=40^\circ$ ($\theta=20^\circ$)

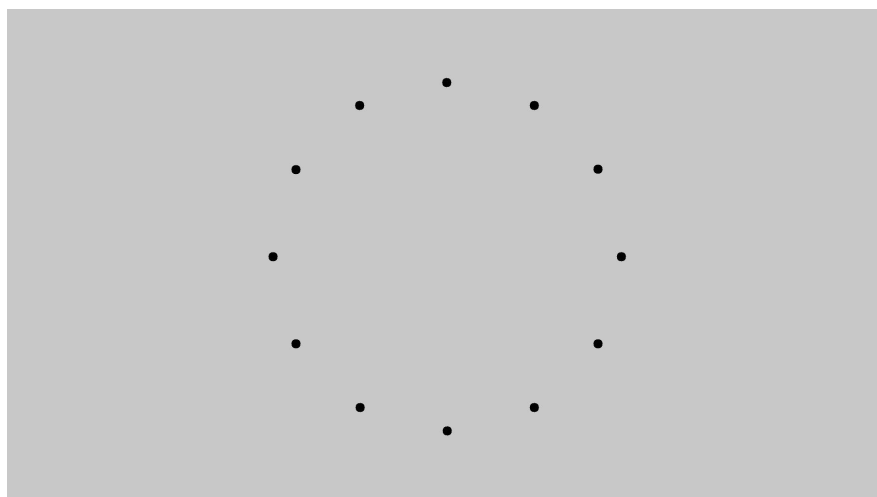


图 A.5.3 目标测试点位 $FOV=60^{\circ}$ ($\theta=30^{\circ}$)

A.6 眼动追踪数据记录

人工眼动追踪数据保存应具有下列类型，保存的数据构成了真值数据系统：

数据名称	数据类型	有效值	坐标系	说明
左眼旋转角度	俯仰角 α 方位角 φ	$0 \leq \alpha < 45^\circ$ $0 \leq \varphi < 360^\circ$	参考5.3.1节坐标系	人工眼左眼转动角度，直观看出FOV大小与注视方向；
右眼旋转角度	俯仰角 α 方位角 φ	$0 \leq \alpha < 45^\circ$ $0 \leq \varphi < 360^\circ$	参考5.3.1节坐标系	人工眼右眼转动角度，直观看出FOV大小与注视方向；
注视目标深度	浮点数	$0 < D < \text{无穷大}$	参考5.3.2节坐标系	人工眼注视目标物体的深度信息
左眼视线方向	三维矢量(x, y, z)	$z \neq 0$	参考5.3.2节坐标系	人工眼左眼注视方向真值；
右眼视线方向	三维矢量(x, y, z)	$z \neq 0$	参考5.3.2节坐标系	人工眼右眼注视方向真值；
双目视线方向	三维矢量(x, y, z)	$z \neq 0$	参考5.3.2节坐标系	人工眼双目注视方向真值；
IPD	浮点数	$54\text{mm} \leq \text{IPD} \leq 72\text{mm}$	参考5.3.2节坐标系	双目瞳距真值；

DUT眼动追踪算法反馈的数据应有如下：

数据名称	数据类型	有效值	坐标系	说明
左眼视线方向	三维矢量(x, y, z)	$z \neq 0$	转为5.3.2节测试坐标系	DUT反馈的左眼注视方向向量；
右眼视线方向	三维矢量(x, y, z)	$z \neq 0$	转为5.3.2节测试坐标系	DUT反馈的右眼注视方向向量；
双目视线方向	三维矢量(x, y, z)	$z \neq 0$	转为5.3.2节测试坐标系	DUT反馈的双目注视方向向量；
红外相机眼图	JPG/PNG	/	/	红外相机拍摄的眼球图像；
时间戳	时间(年/月/日/时/分/秒/毫秒)	/	世界	时间信息，精确到毫秒；
帧数	整数	连续	世界	表示当前帧数，体现其它数据连续性；

注1：红外相机拍摄的眼图可能为用户隐私信息，不一定能够获取眼图；

注2：所有数据应该对应统一坐标系，因此需要对某些数据进行坐标系转换；

A.7 眼动追踪数据筛选

需要对原始眼动追踪数据进行筛选，去除无用数据，只保留每一个目标测试点对应的眼动数据。

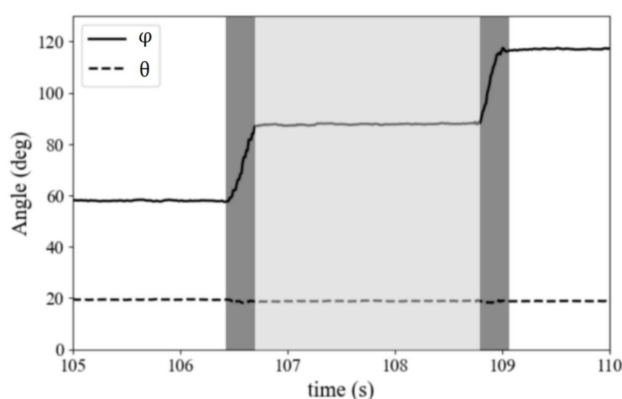
获取左眼（右眼，双目）注视方向原始数据 $\vec{P}_i = (x, y, z)$ ，需要转化到球坐标系下，转换公式如下：

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$

下图A.7.1中画出了在某个目标测试点保存的原始数据经过转化后的方位角和极性角，图中深灰色区域的数据是需要进行剔除，因为这些数据是从一个目标测试点位到另一个测试点位的转动数据，而浅灰色区域的数据是需要保留的，这些数据是眼球注视目标测试点2s的所有数据。



图A.7.1 单眼（双眼）视线方向极性角与方位角

A.8 设备滑移时眼动追踪视线方向准确度测试

穿戴式眼动设备在使用过程中因头部运动，设备重量等多种原因会存在轻微移动情况。本测试主要目的是测试眼动追踪器和眼球的位置关系在校准完成后发生轻微变化时，眼动追踪视线方向的准确度。

设备移动会导致眼动追踪器和眼球的相对空间位置、角度都发生变化，典型的滑移表现如下图所示：

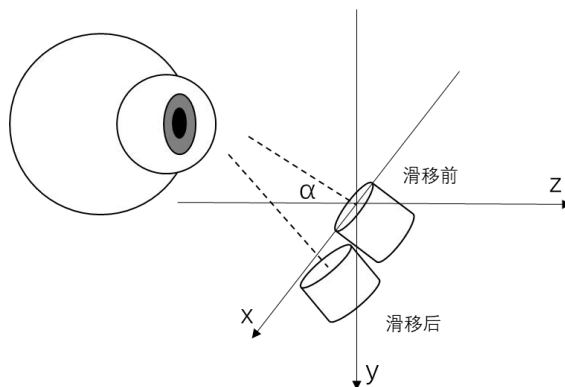


图 A.8.1 典型设备滑移示意图

不失一般性，按图中方向所示，该眼动设备滑移后，显然，相对滑移前，y坐标会增加，z坐标一般会减少，仰角 α 一般会增加。此外，x坐标和其它方向角也会存在一定范围内随机波动。

考虑到测试的可操作性，将滑移后的位置设置为y轴坐标(3mm, 5mm), z轴坐标(0mm, -3mm), x轴坐标(-1mm, 0mm, 1mm)， α 角增量(0° , 2° , 4°)，其它因素暂不加入。上述参数组合后，得到共计 $2*2*3*3=36$ 个新的设备位置姿态。

按照5.5测试流程完成眼动校准流程(步骤1、步骤2)后，对眼动追踪器依次进行上述36个位置姿态的滑动，然后再按照步骤3及之后的步骤完成整个测试。

A.9 眼动追踪测试设备建议

测试项	真实人眼	人工眼	原因
眼动追踪视线方向 准确度	不推荐	推荐	真实人眼注视目标测试点会伴随微眼跳，而非稳定的真值系统； 多轴人工眼机械控制系统，稳定且可控，已知视线方向真值且可设置
眼动追踪延迟	可以使用	推荐	眼电图信号需与PD信号时间戳对齐； 编码器信号与PD信号可通过同一计时器记录时间戳
眼动追踪既定轨迹	不能使用	推荐	真实人眼的注视轨迹真值无法获得； 人工眼注视轨迹真值可获得，且可设置注视点轨迹

A.10 户外环境下眼动追踪综合性能指标测试

本测试主要目的是测试典型户外环境（含正常光照、强光照）下眼动追踪的视线方向准确度、眼动追踪延迟、眼动数据更新频率、眼动追踪既定轨迹等性能指标。

测试环境

在5.1.1的基础上，测试环境为室外，环境光亮度为1000lux~100000lux（阴天~正午太阳直射，不考虑过于极端的光照环境），考虑测试的可操作性，可在如下典型亮度环境下进行测试（）

阴天：1,000lux~3,000lux；

多云~晴朗：3,000lux~30,000lux；

正午晴朗：30,000lux~100,000lux。

测试内容

主要包括以下章节：

5 眼动追踪视线方向准确度（正确度与精密度）的测试

6 眼动追踪延迟的测试方法

7 眼动数据更新频率的测试方法

8 眼动追踪既定轨迹的综合测试方法

具体测试方法参考对应章节内容。

注：户外环境下使用真实人眼易受光照影响，建议使用 5.2.2 中高精度人眼模拟设备。