

目 录

中文摘要	1
英文摘要	1
1 绪论	2
1.1 研究背景与意义	2
1.1.1 研究背景.....	2
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 研究现状、类型	3
1.2.1 国内外研究现状.....	3
1.2.2 眼动仪类型.....	4
1.3 研究内容与章节安排	5
1.3.1 研究内容.....	6
1.3.2 章节安排.....	6
2 眼镜式眼动仪设计	7
2.1 眼镜式眼动仪总体设计	7
2.2 眼镜式眼动仪硬件设计	8
2.2.1 眼动仪头戴部分.....	8
2.2.2 树莓派.....	9
2.2.3 PC 端	10
2.3 眼镜式眼动仪软件设计	10
2.3.1 采集传输系统.....	11
2.3.2 分析处理系统.....	12
2.3.3 映射校正系统.....	14

2.4 本章小结	14
3 眼镜式眼动仪算法研究	14
3.1 人眼结构与运动方式	15
3.1.1 人眼结构.....	15
3.1.2 人眼运动方式.....	15
3.2 瞳孔检测算法研究	16
3.2.1 眼球图像采集.....	17
3.2.2 眼球图像预处理.....	18
3.2.3 瞳孔定位算法.....	20
3.3 视点坐标映射研究	23
3.3.1 映射方法研究.....	23
3.3.2 映射系统设计.....	24
3.3.3 映射系统的校准流程.....	26
3.4 视点标记与显示	27
3.5 本章小结	27
4 系统设计效果及测试分析	28
4.1 本设计瞳孔定位算法测试	228
4.2 眼镜式眼动仪整体设计效果	29
4.3 本章小结	30
结论	31
参考文献	33
附录	36
外文翻译	47

基于树莓派的眼镜式眼动仪设计与实现

电子信息科学技术 2016 级 邓昭宇

摘 要：眼动仪是一种主要用于心理学、运动学、设计学研究中的设备，能测量眼球位置与眼球运动。目前眼动仪绝大多为进口产品，且价格高昂，头戴式较为笨重。因此，本设计研制一款成本低廉、开源、轻便的眼镜式眼动仪，主要包括了硬件系统的搭建和软件系统的编写。硬件系统包括眼动仪头戴部分、树莓派、PC 端，需要搭建包括红外摄像头、前置摄像头的眼动仪头戴部分并连接树莓派。软件系统包括采集传输系统、分析处理系统、映射校正系统，其中的核心部分瞳孔检测算法研究阐述了眼球图像的预处理与瞳孔定位算法的研究与技术实现，视点映射坐标研究阐述了映射方法的研究与映射系统的设计。本设计的成果眼镜式眼动仪能实时检测瞳孔坐标并映射到前置场景中实时显示注视点。在测试中瞳孔中心定位有相当高的准确性。

关键词：眼动仪；瞳孔定位；视点坐标映射；树莓派

Design and Implementation of Spectacle Eye Tracker Based on Raspberry Pi

Abstract: An eye tracker is a device that can track and measure eye position and eye movement information, and is mainly used in psychology, kinematics, and design studies. Most of the current eye tracker are import products, whose price is high, while the head-mounted type is relatively bulky. Therefore, this project develops a low-cost, open source, light-weight spectacle eye tracker, mainly includes the building of hardware system and the coding of software system. The hardware system includes the eye tracker head-mounted part, Raspberry Pi, and PC, which need to build an eye tracker head-mounted part including the infrared camera and the front camera and connected to the Raspberry Pi. The software system includes the acquisition and transmission system, analysis processing system, and mapping correction system. The core part of the pupil detection algorithm study describes the research and technical realization of the eyeball image preprocessing and pupil positioning algorithm. Fixation mapping system describes the research of mapping method and the design of mapping system. The achievement of this design, glasses eye tracker, can detect the pupil coordinates in real time and map it to the front scene to display the fixation point in real time. In the test, the positioning of the pupil center has a relatively high accuracy.

Key words: Eye tracker; Pupil location; Fixation coordinate mapping; Raspberry Pi

1 绪论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

俗话说,眼睛是人的心灵之窗,那么眼动仪就是探究心灵的工具。约有 80~90%的外界信息是通过人眼获取的,因此信息加工高度依赖眼睛。同时人的视线具有直接性、自然性和双向性等特点,因此对视线的研究经久不衰^[1]。

眼动仪是一种主要用于心理学、运动学、设计学研究中的眼球运动跟踪设备统称,能测量眼球位置与眼球运动,在心理学、视觉系统、认知语言学的研究中有广泛的应用。眼动的本质是人注意力资源的主动或被动分配,即选择更有用或吸引力的信息^[2]。

基于此原理,眼动仪可用于用户体验与交互研究(网页可用性、视线交互)、市场研究与消费者调研(包装设计、购物行为、广告研究)、婴幼儿研究(发展心理学研究)、心理学与神经科学(认知/神经/社会心理学、视觉感知)、人的效能研究(体育运动、新手-专家范式)、教育研究(教学环境研究)、临床研究等领域(眼科学、孤独症、眼动缺陷研究)^[3,4,5,6]。

1.1.2 研究意义

眼动仪应用场景广阔,可用于心理学、视觉认知、市场研究、人机交互、产品设计等领域,具有广阔的市场前景^[7]。

眼动仪在运动心理学中同样应用广泛。运动员在训练中的眼动信息被记录下来,在后期通过分析运动员的眼动,并及时反馈,能够提

高运动员的运动水平，或使教练员参照信息指导新手运动员^[8]。

相对于欧美等国的眼动仪技术，我国的眼动仪技术仍有很长一段距离需要追赶。且一套国外眼动仪动辄 30 万元以上。国内高校、研究机构皆采购国外几家大公司的眼动仪用作研究，而国内的眼动仪制造研究进展缓慢，仅有几家小公司近年来发布一些初级的眼动仪产品。同时针对运动用途的轻便眼动仪仍存在市场的空缺。

基于此生产技术跟不上研究需求的现状，国内亟需发展眼动仪技术。

本设计“基于树莓派的眼镜式眼动仪”有 4 个创新点：

（1）高采样：利用最新树莓派 3B+的高算力，提高摄像头瞳孔运动的实时采样处理速率，以获得更精细的眼球运动记录。

（2）便捷性：与遥测式眼动仪和头盔式眼动仪相比，基于树莓派的眼镜式眼动仪允许参与者在自然运动环境下进行眼动研究；同时具有更高的舒适性、便捷性，对被摄对象为人的实验影响更小。

（3）实时性：使用图传设备实现无线实时眼动注意点视频流传输。使主试可以实时观察被试的行为，并及时调控被试行为，提升实验的灵活性。

（4）开源性：代码及手册上传至 Github 开源。

1.2 国内外研究现状、类型

1.2.1 国内外研究现状

（1）国外研究现状

国外有许多顶尖的仪器公司在做眼动仪：如瑞典 Tobii、德国 SMI、

美国 RS、德国 Dikablis 和加拿大 Eyelink。这些公司经过技术积累，已经做出了世界最顶尖的遥测式、头戴式或眼镜式眼动仪。已被众多学校、研究机构与公司采用。其中使用较多的有加拿大 SR 公司的 EyeLink II，美国 ASL 生产的 H6 型眼动仪，瑞典 Tobii 公司生产的 T60 和 T120 型眼动仪，大都采用了角膜反射法技术^[9,10]。

（2）国内研究现状

在上世纪 80 年代末，中科院上海生理研究所的张明魁等人研制了外光电反射眼动测量技术，90 年代西安电子科技大学研制了头盔式眼动仪^[11]。

而目前国内主要有 3 家公司做眼动仪：上海青研、北京七鑫易维与 EyeSo。七鑫易维倾向于 VR 眼控，上海青研则是更倾向于 AR 眼控技术，与眼动研究无关。国内的 EyeSo 公司有一系列的眼动仪产品，其于 2017 年发售的 EyeSo Glasses 是一款头戴式眼动仪，但其需要背负一台放在背包中的个人电脑，其便捷性、舒适性欠缺，且不适用于体育等领域。

1.2.2 眼动仪类型

眼动仪记录眼动的方法主要有 4 种：机械记录法、电流记录法、电磁感应记录法、光学记录法^[12]。

机械记录法是通过机械传动眼球的运动以记录眼动信息，电流记录法通过对眼球肌肉放电信息记录以检测眼球运动，这两种方法精度较低、个体差异较大，在现代应用较少。在电磁感应记录法中，测试者需要佩戴带有线圈隐形眼镜，通过电磁感应即可无需接触地记录眼

球运动；但佩戴隐形眼镜会使测试者感觉不适。

光学记录法是现代应用最广泛的眼动仪记录方法，依靠摄像头、红外二极管等光学器件对眼球的瞳孔定位，并能使用角膜、巩膜的反射原理进行防干扰等；一般需要在测试者固定头部或头部佩戴设备以检测头部与眼球的运动。

光学记录法的眼动仪总体上可分为非头戴式和头戴式。非头戴式一般固定在测试者前方，无需佩戴设备，无任何不适；但由于摄像头和人的距离不固定，使得图像处理难度大、准确性相对较差。头戴式眼动仪细分为托架式眼动仪与头盔式眼动仪。托架式是指需要把测试者的头固定在眼动仪升降台上进行眼动测量；头盔式是让测试者佩戴一个头盔仪器，允许小范围的头部移动。

光学记录法的原理主要有 3 种：角膜反射法、巩膜-虹膜边缘法、瞳孔-角膜反射向量法^[13,14]。

角膜反射法是根据红外光在突出眼球表面的角膜上的反射光点位置变化，通过摄像头获取从而计算出眼动位置。巩膜-虹膜边缘法同样使用红外光照射眼球，在人眼周围放置红外光敏管接收巩膜与虹膜反射的光，通过反射光的强弱变化可计算出眼动运动。瞳孔-角膜反射向量法使用红外摄像头获取眼球图像，使用瞳孔识别算法计算出瞳孔的中心点，并获取角膜反射光点位置，把场景坐标与视点坐标设立一个映射方程，从而计算出注视点；此方法精度高，无不适感，是当下应用最广的眼动检测方法。

1.3 研究内容与章节安排

1.3.1 研究内容

本设计基于树莓派的眼镜式眼动仪是研制一款基于树莓派微型电脑的、只需佩戴眼镜大小设备的头戴式眼动仪。本设计功能为获取眼球瞳孔位置并计算出眼球注视位置，主要用于心理学、视觉认知、市场研究、人机交互、产品设计等领域。眼动仪大多为进口产品并价格昂贵，加上针对在自然环境场景下使用时需求，因此本设计的目标是研制一款成本低廉、佩戴便捷的眼镜式眼动仪。

其详细内容包括：

眼镜式眼动仪硬件系统的设计：现代眼动仪的技术发展趋势是微型化与无干扰。微型化是使设备体积减小，方便使用人员携带与能在更多样的环境下使用。无干扰指的是眼动仪在使用过程中应使得测试者感觉不到它的存在。本设计基于此理念，采用眼镜式的头戴眼动仪，即眼动仪的头戴部分仅有眼镜大小，与平时佩戴眼镜无异。

眼镜式眼动仪软件系统的设计：本设计的软件系统主要包括以下方面：（1）眼球图像采集，使用红外微距摄像头采集眼球图像；（2）前置图像采集，使用前置高清摄像头采集图像；（3）图像传输，使用Wi-Fi进行图像传输；（4）图像预处理，对图像进行编码、灰度化、二极化的处理；（5）瞳孔标定，使用算法标定瞳孔中心；（6）视点映射，把瞳孔坐标映射到前置画面坐标；（7）映射校正，确定瞳孔坐标与前置坐标的映射关系。总体架构有参考郭北苑^[15]、姜慧慧^[16]、Mantiuk^[17]的研究成果。

1.3.2 章节安排

本文共分为四章，主要内容如下：

第一章为绪论，主要介绍研究背景与意义、研究现状、眼动仪种类、研究内容。

第二章详细描述了眼镜式眼动仪的硬件与软件设计。

第三章详细描述了眼镜式眼动仪的算法，主要有瞳孔检测算法、视点坐标的算法。

第四章展示了瞳孔定位算法测试效果与眼镜式眼动仪整体效果。

终章为结论部分，总结全文内容，并进行展望。

2 眼镜式眼动仪设计

眼镜式眼动仪由硬件部分和软件部分两大部分组成，本章对此作深入的讨论。

2.1 眼镜式眼动仪总体设计

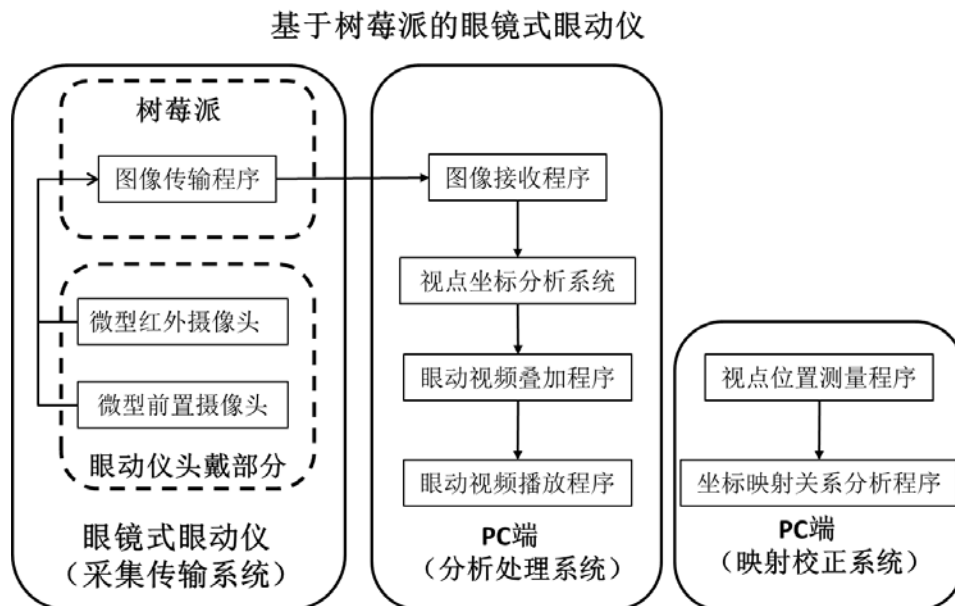


图 2.1 眼镜式眼动仪总体设计图

图 2.1 是眼镜式眼动仪的总体设计图。全系统在软件层面分为 3 部分：采集传输系统、分析处理系统、映射校正系统；在硬件层面分为 2 部分：眼镜式眼动仪、PC 端，其中眼镜式眼动仪由眼动仪头戴

部分、树莓派组成。

首先,眼动仪头戴部分中的微型红外摄像头和微型前置摄像头把获取的图像传到树莓派中的图像传输程序,通过 Wi-Fi 传到 PC 端的分析处理系统中的图像接收程序,随后传到视点坐标分析系统得到视点坐标,然后在眼动视频叠加程序中把计算出的映射位置与前置视频帧叠加形成眼动视频,最后在眼动视频播放程序实时播放。在映射校正系统中,通过视点位置测量程序获得自变量瞳孔坐标和因变量前置视点坐标,随后使用坐标映射关系分析程序得出线性映射参数。

2.2 眼镜式眼动仪硬件设计

眼镜式眼动仪硬件由 2 大部分组成:眼镜式眼动仪、PC 端,其中眼镜式眼动仪由眼动仪头戴部分、树莓派组成。

2.2.1 眼动仪头戴部分

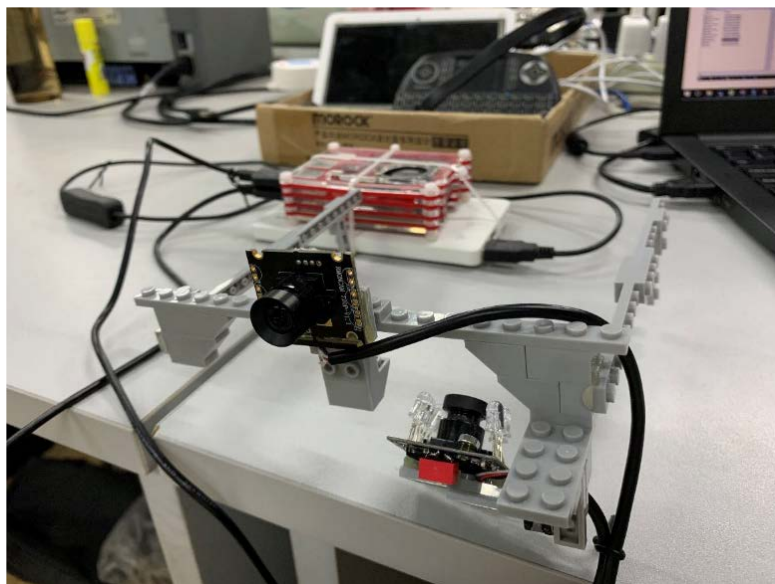


图 2.2 眼动仪头戴部分

如图 2.2 所示,眼镜式眼动仪的眼动仪头戴部分由 3 大部分组成:微型前置摄像头、微型红外摄像头、眼镜框架。眼动仪头戴部分的主要目的是获取高质量的人眼红外图像与高清前置图像。

使用红外光照射对眼球瞳孔图像的获取有 3 个优点：（1）使瞳孔与虹膜的边缘清晰可辨；（2）减少环境光源对眼球图像的干扰，因为使用较强红外光源能使照射区域亮度保持一个较高的亮度，其它光源照射的影响会减弱；（3）不会吸引人的注意，如果使用可见光源将吸引人的注意。

基于以上因素，本设计选择微型微距红外摄像头，能手动旋转调节焦距，并自带 6 支红外发光二极管，后期加上一个开关模块以控制发光。由于摄像头不能阻挡视线，因此将红外摄像头安放在眼球斜下方约 30° 处。在本设计中暂时仅有单眼的红外摄像头，更理想的设计应是双眼都有摄像头。

微型前置摄像头的作用是获取眼球视线范围的图像，以直观地表示测试者所注视的位置。使用了 720P 的高清摄像头。

眼镜框架作用是固定红外摄像头与前置高清摄像头，其外形与普通眼镜镜框无异，在此原型机中使用乐高颗粒积木搭建并由热熔胶加固。

2.2.2 树莓派



图 2.3 树莓派

针对成本低廉、佩戴便捷、开发难度适中的需求，选择树莓派微型电脑作为眼镜式眼动仪的核心。树莓派（Raspberry Pi）是由“树莓派基金会（Raspberry Pi Foundation）”开发的微型计算机，仅有信用卡大小，操作系统一般使用基于 Linux 的 Raspbian 系统。树莓派价格低廉、体积迷你、功能强大，十分适合作为嵌入式系统的核心使用。

在本设计中，使用树莓派 3B+ 版本，出于对其保护与移动供电的需求，对其加上外壳、散热风扇，并与移动充电宝固定在一起。其体积小小到可放置于口袋。

微型红外摄像头和前置摄像头与树莓派的连接接口为 USB 接口，为数字信号；经过初步处理后，由树莓派自带的陶瓷天线通过 Wi-Fi 传到个人电脑上接收。

2.2.3 PC 端

PC 端即一般的个人电脑，在本设计中笔者使用 Thinkpad 笔记本电脑，采用 Windows10 操作系统。

虽然树莓派的算力经过技术演进已有长足的提升，但相较于桌面级电脑，算力仍旧小巫见大巫。鉴于本设计对于图形计算能力有相当的要求，因此把计划中大量的运算从树莓派转移到 PC 端以提升效率。

PC 端与眼镜式眼动仪之间使用 Wi-Fi 进行信息交互。

2.3 眼镜式眼动仪软件设计

如图 2.1 所示，基于树莓派的眼镜式眼动仪软件系统主要分为三大块：运行在眼镜式眼动仪的采集传输系统、运行在 PC 端的分析处理系统、运行在 PC 端的映射校正系统。

系统含有 5 个 Python 程序源码文件与 1 个 MATLAB 脚本。其中采集传输系统是 sendvideo.py；分析处理系统主程序是 RecvPupilDetMap.py，pupildet.py、tools.py 是封装起来的方法；映射校正系统中，视点位置测量程序是 GetWinMousePos.py，坐标映射关系分析程序是 MapParameter.m。

2.3.1 采集传输系统

眼镜式眼动仪的采集传输系统硬件上由两部分组成：树莓派和眼动仪头戴部分。眼动仪头戴部分有两个摄像头作为输入，分别是微型红外摄像头和微型前置摄像头，摄像头内已集成程序，通过 USB 接口传输数字视频信号。微型红外摄像头对眼球的红外图像进行采集，微型前置摄像头对前方彩色图像进行采集。两个摄像头通过 USB 接口连接树莓派传输图像。树莓派中的图像传输程序通过 Wi-Fi 传输图像到 PC 端的图像接收程序。

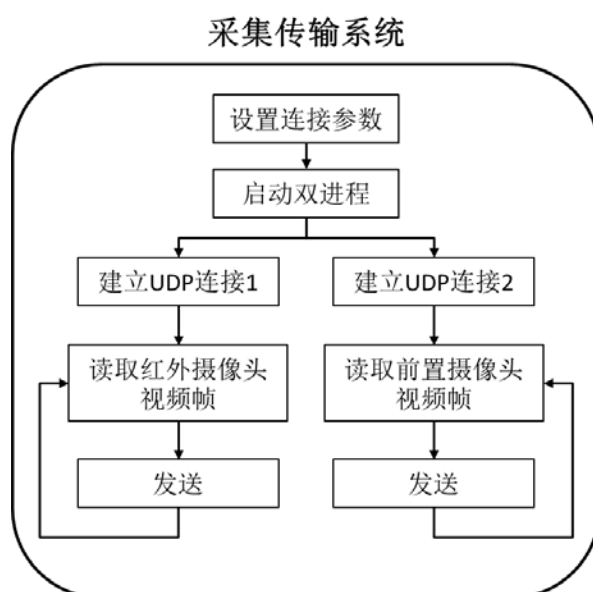


图 2.4 采集传输系统流程图

如图 2.4 所示，采集传输系统中，首先设置连接参数，随后启动

两个线程，分别是微型红外摄像头的进程 1 和微型前置摄像头的进程 2，随后分别循环读取线程分配的摄像头帧并通过 UDP 发送到 PC 端的图像接收程序。

此系统使用了类库 `socket` 的方法建立与 PC 端之间的基于 UDP 协议的 Wi-Fi 连接，以传输视频帧数据；使用了 `OpenCV` 的方法获取摄像头的视频帧，并进行压缩编码，以满足更高效的传输需求；使用 `Process` 的方法建立双进程以最大化使用 CPU，并使得两个视频流同步传输；使用 `socket` 作为客户端向分析处理系统传输数据。

2.3.2 分析处理系统

PC 端的分析处理系统由四部分组成：图像接收程序、视点坐标分析系统、眼动视频叠加程序、眼动视频播放程序。图像接收程序接收树莓派上的图像传输程序传输的图像，传到视点坐标分析系统，检测瞳孔的中心，再根据映射校正系统的参数计算出映射在前置摄像头画面的坐标，并叠加在前置摄像头画面上，并播放为眼动视频。

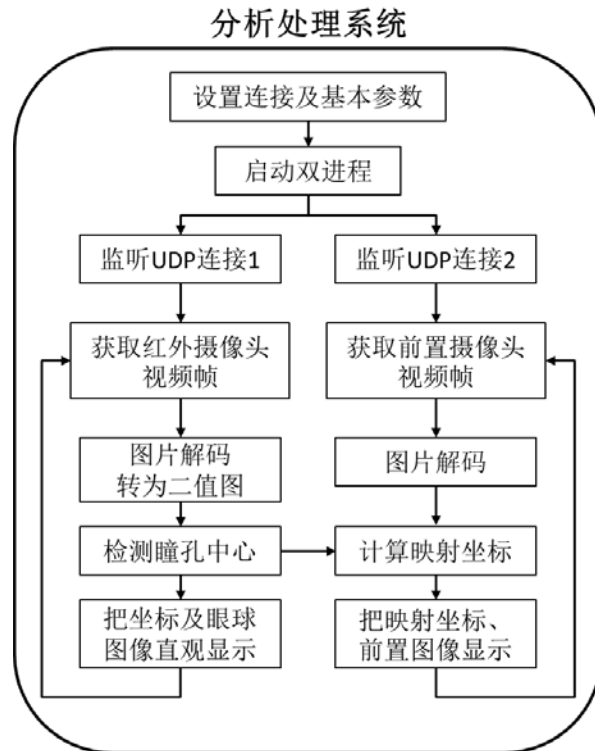


图 2.5 分析处理系统流程图

分析处理系统中，首先设置连接及基本参数，随后启动两个进程，分别是接收并分析红外摄像头帧的进程 1 和映射坐标到接收的前置摄像头帧的进程 2。进程 1 监听来自树莓派的红外摄像头视频帧，随后获取到视频帧，再把图片解码并转为二值图，然后用 `pupildet.py` 中的算法检测出瞳孔中心，通过 `pipe` 进程间通信把坐标传到进程 2 中，为了直观，本程序把眼球图像和坐标对应的十字光标叠加的视频在窗口显示，以便观察检测情况。进程 2 监听来自树莓派的前置摄像头视频帧，随后获取到视频帧，再把图片解码，通过 `pipe` 接收到最新的瞳孔坐标，通过校正时获得的参数计算出映射后的前置摄像头画面上的坐标，最后把坐标以圆形光标的形式与前置摄像头画面叠加视频在窗口显示，表现出使用者眼球注视的位置。

此系统使用了 `OpenCV` 以解码图片数据，同时转换 `BGRA` 格式

和灰度图以显示和检测瞳孔；使用 `numpy` 以进行矩阵运算；使用 `pygame` 作为图形用户界面(GUI)，以显示视频帧并添加必要的光标；使用 `socket` 作为服务器接收采集传输系统的数据；使用 `multiprocessing` 的 `Process` 进行双进程，使用 `Pipe` 作为进程间的数据传输桥梁。

2.3.3 映射校正系统

映射校正系统需要一系列的操作以得出视点线性映射方程的参数。

首先固定测试者的头部到适合高度，正对提供的校准图片并距离 1 米左右，先截取固定好头后的前置摄像头图像窗口。然后运行 `RecPupilDetMap` 主程序，通过命令行的瞳孔坐标输出分别记录人眼看校准图片的九个点对应的瞳孔坐标，然后使用 `GetWinMousePos` 记录前面截图的前置摄像头画面的九个点的坐标，最后输入 `MapParameter` 中并计算出线性回归分析出映射的参数，供分析处理系统使用。

2.4 本章总结

本章首先深入讨论了本设计中的硬件系统，详细介绍了眼动仪头戴部分的制作、树莓派的选取和 PC 端的设置。然后讨论了软件系统，详细介绍了采集传输系统、分析处理系统、映射校正系统的编写和设计。

3 眼镜式眼动仪算法研究

在眼镜式眼动仪的设计中有核心的算法，主要有瞳孔检测算法和

视点坐标映射算法等。本章对此作深入讨论。

3.1 人眼结构与运动方式

3.1.1 人眼结构

人眼是一个近似球状体，通常称为眼球，主要由巩膜、虹膜、瞳孔、角膜等结构组成^[18]。

巩膜是最外层白色、坚韧的膜层，约占眼球壁 5/6。角膜在眼球的正前方，约占眼球壁 1/6，是一层透明薄膜。虹膜是位于角膜之后的环状膜层，其颜色因色素和分布的不同而异^[18]。虹膜的内缘称为瞳孔，作用类似于光圈。

其中，虹膜具有一个特性，即虹膜的颜色对红外光的反射影响不大；换句话说，棕黑色的虹膜在红外摄像头的画面中颜色是较浅的。

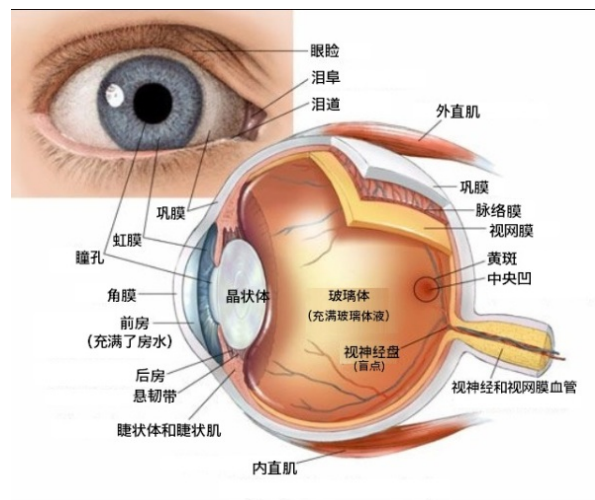


图 3.1 人眼结构

3.1.2 人眼运动方式

眼动具有 3 种基本形式，分别为注视、眼跳、追随运动^[19,20,21,22]。

(1) 注视

注视指眼球的中央凹对准某一目标超过 100 毫秒，以获得充分的加工形成清晰的成像。同时眼球并不是绝对的静止，仍有 3 种持续的微弱运动：(1) 高频震颤，运动幅度小于 1° ，作用是保持视觉细胞

敏感性；(2) 慢漂移，使特定物体成像远离中央凹；(3) 微跳动，校正慢漂移的偏差，确保持注视状态。

(2) 眼跳

眼跳指注视的目标从一个目标转移到另一个目标的快速跳跃过程。在眼跳过程中眼球移动速度过快，持续时间为 30~120 毫秒，几乎无法分辨物体。

(3) 追随运动

追随运动指的是被注视目标与眼球存在相对运动时，眼球做平滑地跟随目标运动。是一种受到目标运动刺激引起的反射运动，最大运动速度为 $30^{\circ}/s$ 。

除以上 3 种基本运动方式，眼睛还有频繁的眨眼运动。眨眼是一种保护性的反射运动，在眼睛干涩、遇到强光、快速接近物体时会出现。在眼动仪的图像处理中，频繁的眨眼是不可忽视的干扰因素。

3.2 瞳孔检测算法研究

视点坐标映射系统分为两大部分：瞳孔检测系统与坐标映射系统。在此详细论述瞳孔检测系统的设计。

瞳孔检测算法是整个眼镜式眼动仪软件系统的核心，其准确性直接决定眼动仪的可用性，影响后续的视点坐标映射。瞳孔检测系统的总体思路是接收到红外摄像头视频帧数据后，先解码再转换成灰度图，再截取 ROI（感兴趣区域）后转为二值图，然后到瞳孔检测的核心算法检测出瞳孔的中心，然后补偿 ROI 坐标，最后把坐标发送到前置摄像头的进程。如图 3.2 所示。

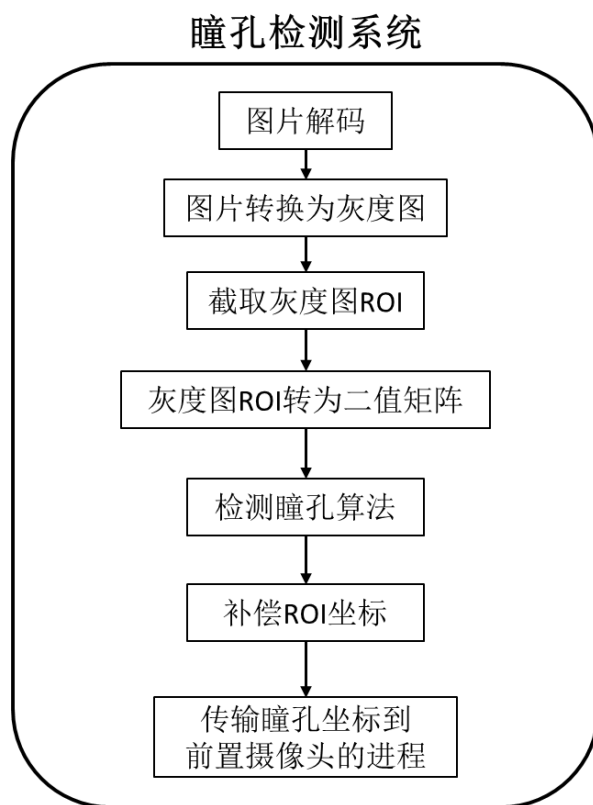


图 3.2 瞳孔检测系统流程图

3.2.1 眼球图像采集

对于微型红外摄像头对眼球图像的获取，需要注意一些问题。在可见光照射下，大部分中国人的虹膜呈棕黑色，与瞳孔颜色近似，如果使用可见光照亮眼球以获取瞳孔图像，存在瞳孔界限模糊难以识别的问题。当使用红外光源时，会发现虹膜的反射率比可见光情况下高许多，因此使得瞳孔边缘非常清晰，如图 3.3。

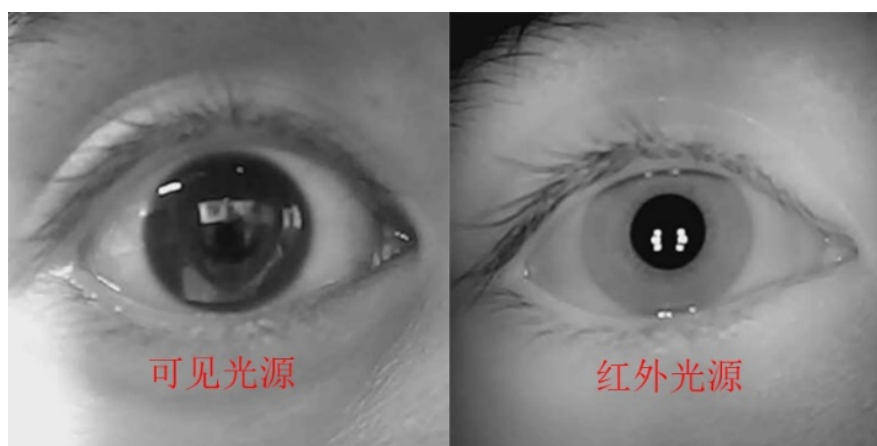


图 3.3 可见光源与红外光源照射眼球效果对比

总的来说，使用红外光照射、使用红外摄像头对眼球瞳孔图像的获取有 3 个优点：（1）使瞳孔与虹膜的边缘清晰可辨；（2）减少环境光源对眼球图像的干扰；（3）不会吸引人的注意。

3.2.2 眼球图像预处理

眼球图像预处理是对红外摄像头视频帧的图像进行初步分析的处理过程，目的是为瞳孔定位核心算法的分析做好准备。

具体的步骤有：（1）把获取的 **BGR** 图像转换为标准灰度图；（2）截取灰度图的 **ROI**（感兴趣区域）；（3）把灰度图二值化。具体如图 4.1 所示。

3.2.2.1 图像灰度化

从红外摄像头获取的图形是 **JPEG**（联合图像专家组）编码的数据，解码后为 **BGR** 格式的图像，每像素具有 24 位的信息。而灰度图为每像素具有 8 位的信息，即图像深度为 8 位。由于在本设计中红外摄像头图像仅用于瞳孔检测，而瞳孔为纯黑色，边缘四周为灰白色，不需要基于颜色的识别，因此使用灰度图能大大提高图像分析的效率。

（注：**OpenCV** 使用 **BGR** 格式而非 **RGB**）

灰度化有 4 种常用的方法：

（1）分量法

将 **BGR** 图像中的三分量的亮度作为三个灰度图像的灰度值，根据应用需求选取一种灰度图像^[13]。

$$f_1(i, j) = B(i, j); f_2(i, j) = G(i, j); f_3(i, j) = R(i, j); \dots (3.1)$$

（2）最大值法

将 **BGR** 图像中的三分量亮度的最大值作为灰度图的灰度值^[13]。

$$f(i,j) = \max (B(i,j), G(i,j), R(i,j)) \dots\dots\dots (3.2)$$

(3) 平均值法

将 BGR 图像中的三分量亮度求平均值作为一个灰度值^[13]。

$$f(i,j) = \frac{(B(i,j),G(i,j),R(i,j))}{3} \dots\dots\dots (3.3)$$

(4) 加权平均法

根据重要性及其它指标,将三个分量以不同的权值进行加权平均能得到较合理的灰度图像^[13]。

$$f(i,j) = 0.072B(i,j) + 0.715G(i,j) + 0.212R(i,j) \dots\dots\dots (3.4)$$

由于加权平均法以人眼视觉细胞的灵敏度生物特性作为基础,是最合理的方法,且 OpenCV 中的默认灰度化方法采用的是加权平均法,因此在本设计中图像灰度化使用的是加权平均法。

3.2.2.2 截取 ROI

在图像处理领域,ROI(感兴趣区域)是从图像中圈定的一个图像区域,该区域是图像分析所关注的重点^[13]。方便进行进一步处理,有减少处理时间,增加精度等优点。

在本设计中,由于红外摄像头固定在眼动仪头戴部分,因此与眼部位位置相对静止,所以眼球总在所拍摄区域的一小块区域,因此该区域为本设计中瞳孔检测的 ROI。如图 3.4 所示。

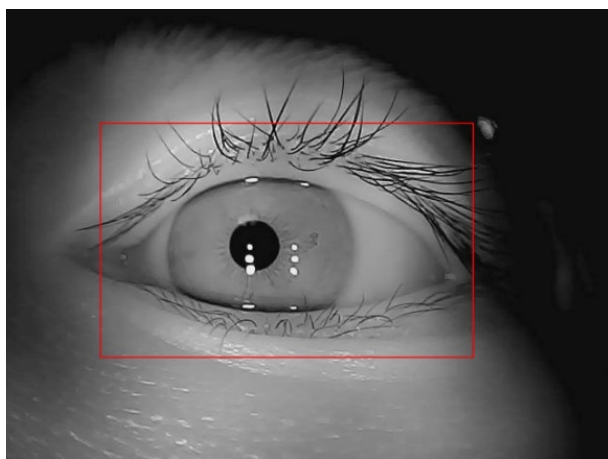


图 3.4 ROI 定位

3.2.2.3 图像二值化

二值图即图像上的每个像素只有 1 和 0 两种可能取值的图片,即只有黑和白的图。在图像处理过程中,一般采用能反映原图的特征的阈值生成二值图。

在本设计中,像素灰度比阈值小的为 1 (黑色),灰度比阈值大的为 0 (白色)。根据经验调试,阈值设定为 30。效果如图 3.5 所示。

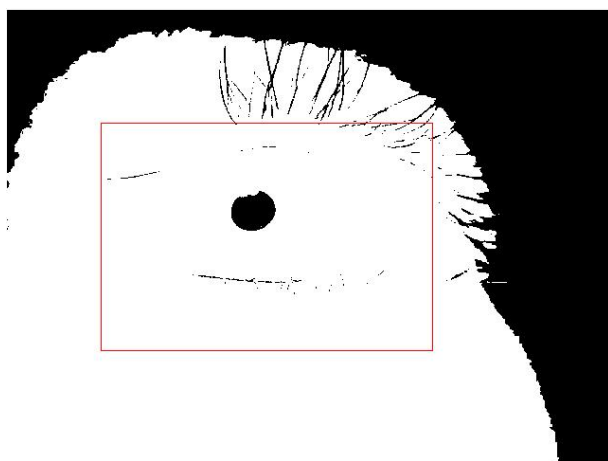


图 3.5 二值化后的图像

3.2.3 瞳孔定位算法

瞳孔检测算法的研究经历了两个阶段,起初使用常用的 OpenCV 自带的 Hough 变换圆检测检测瞳孔坐标,但效果不理想,而后改为自己研究的瞳孔定位算法。

3.2.3.1 Hough 变换检测

Hough 变换是一种特征检测，被广泛应用在图片分析、计算机视觉等图像处理领域^[13]。常见的有直线、圆的检测。其圆检测原理是首先进行边缘检测，对边缘作弧线的半径，对所有点所穿过的半径进行统计降序排序，排列靠前的点其为圆心的几率更大。

起初的设计使用 OpenCV 的快速 Hough 圆检测。但经过测试发现存在不可忽视的问题：

(1) 人眼是一个球体而非一个平面，因此人眼转动过程中，大部分情况下瞳孔并不是理想的圆，甚至会出现椭圆焦距过远、眼睑遮挡瞳孔的情况,对 Hough 圆检测准确性影响很大。如图 3.6 所示。

(2) 同样因为人眼是球体，对于我购买的微距摄像头，瞳孔在较远的角度时图像会出现模糊。而 Hough 圆检测是依赖于边缘检测的算法，对模糊的边界存在识别困难的问题，因此对准确性影响也大。

(3) 由于 Hough 检测是一种投票算法，需要对全图片像素逐一进行分析，且由于是图像处理算法，需要较高的算力。不适合对人眼图形进行实时处理。

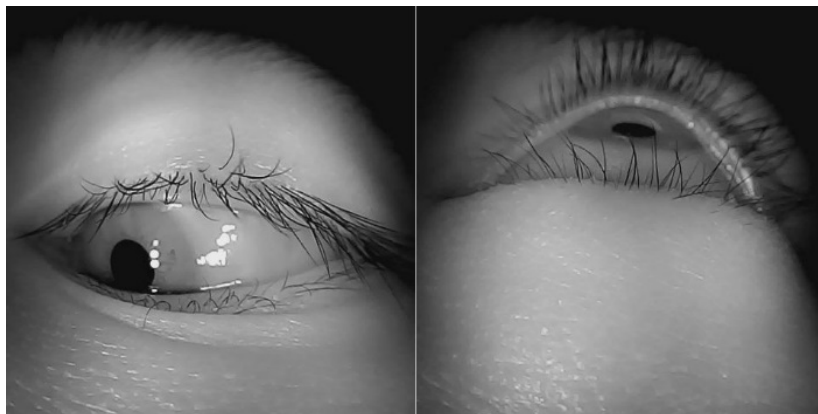


图 3.6 Hough 圆检测相当不理想情况

因此，瞳孔检测常用的 Hough 圆检测相对适合非头戴式的摄像头离眼球距离较远的眼动仪，而不适合头戴式特别是距离更近的眼镜

式眼动仪。

3.2.3.2 本设计瞳孔定位算法

由于使用 **Hough** 圆检测达不到合格的准确度、适应性不强，笔者决定自己研究一个新的瞳孔定位算法，更简练、快速。本算法先使用 **MATLAB** 编写与测试，然后移植到 **Python** 的程序中。

根据观察，无论瞳孔朝向任何方向，红外摄像头所获得的瞳孔图像总为一个椭圆形，极小情况下为被遮盖的椭圆形。同时，只要二值化阈值选择合适、**ROI** 范围尽量小，便能获得一张没有大块黑暗区域干扰的二值图。

因此，本设计中的瞳孔定位算法思路是：（1）在 **ROI** 的二值图中找到最长的 1 横向线段；（2）在（1）找到的线段横坐标范围内找到最长的 1 纵向线段；（3）取横向线段中点的横坐标，取纵向线段中点的纵坐标，两坐标结合所对应的点便是近似的瞳孔中心坐标。直观效果如图 3.7 所示。

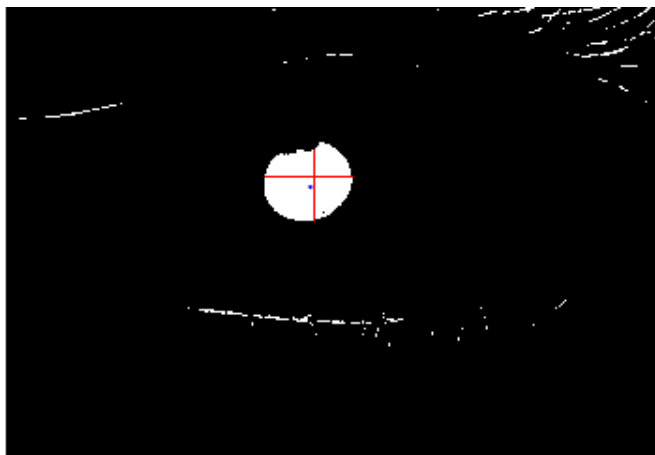


图 3.7 瞳孔定位算法效果图

至于为何需要选择两条线段中点坐标而不是两线段的交点，是因为红外摄像头两旁用于照射眼球的 6 支红外二极管会在瞳孔在一定

位置时在瞳孔上留下光斑，即二值图中的瞳孔出现边缘缺损或包含光斑，此时两最长线段交点并非瞳孔中心，两条线段中点坐标更加接近中心。

此方法同样有一个重大缺陷——无法分辨人眼是否关闭，即眨眼动作会导致不正常的瞳孔定位。此缺陷暂时没有克服。

3.3 视点坐标映射研究

视点坐标映射系统分为两大部分：瞳孔检测系统与坐标映射系统。在此详细论述坐标映射系统的设计。

眼动仪的根本功能是记录眼睛在场景的注视点和眼动轨迹，由此根据轨迹图、热力图、注视时间等信息以判断人的心理活动。因此能把眼动数据真实反映到场景中非常重要。

本系统的功能即是把瞳孔检测系统所计算出的瞳孔坐标计算出在场景中的眼睛注视点，即所谓的把瞳孔坐标映射到前置画面中。

3.3.1 映射方法研究

传统上眼动仪的标定根据测试时头部是否运动，分为静态标定和动态标定^[23]。静态标定指的是托架式眼动仪那种固定头部的标定方法，对测试者要求高，准确性较高。动态标定指测试时测试者头部会移动的情况，一般指遥测式眼动仪，其允许测试者头部自由移动，但对于标定算法要求极高。

本设计在物理上红外摄像头与前置摄像头是固定在同一个眼睛框架上的，因此两个摄像头的画面是相对静止的。因此，本设计必须使用静态标定方式进行映射。

静态标定方法算法简单，且保证有相对高的精度。基本原理即是

场景上校准点坐标与对应的瞳孔中心坐标之间的数据关系，由此求出反应前置画面与红外画面瞳孔中心的一一对应映射方程。常用的方法有模板匹配法、凝合标定算法。

在此鉴于本设计硬件仅有单眼的红外摄像头与单个前置摄像头，仅采用简单的线性映射方法。

3.3.2 映射系统设计

简单来说，坐标映射系统的功能是，把红外摄像头画面瞳孔中心坐标映射到前置摄像头画面的对应坐标。

坐标映射系统的总体设计思路是，首先对前置摄像头视频帧数据进行图片解码，然后从瞳孔检测系统获取瞳孔中心坐标数据，随后根据线性映射方程计算出前置摄像头画面中对应的坐标。如图 3.8 所示。

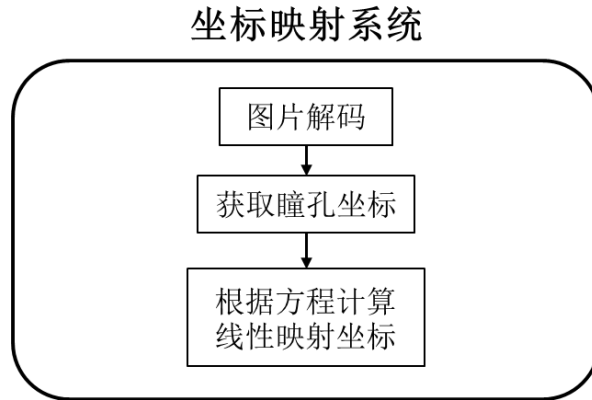


图 3.8 坐标映射系统流程图

3.3.2.1 映射系统的方程

如上文所述，本设计使用简单有效的线性映射方程。即

$$\begin{cases} x_m = k_x x_c + x_0 + x_{offset} \\ y_m = k_y y_c + y_0 + y_{offset} \end{cases} \dots\dots\dots (3.5)$$

其中 x_m 、 y_m 为前置摄像头视频帧中的映射后横纵坐标，即人眼所注视的位置； x_c 、 y_c 为红外摄像头视频帧中的瞳孔中心横纵坐标。

其中 k_x 、 k_y 为自变量系数， x_0 、 y_0 为常数项，这两对参数在线性映射方程中为常数，由映射校正系统计算得出。由于总会出现校正后的偏移现象，特此增加 x_{offset} 、 y_{offset} 参数，即手动调整的横纵偏移值，以抵消偏移现象。

在本设计中，映射系统方程的参数如图 3.9 所示

```
# 瞳孔位置线性映射到前置坐标参数
self.x0 = 1437.719
self.kx = -3.8632
self.y0 = -841.1098
self.ky = 6.2992
# 手动测试调整偏移值
self.offset_x = -50
self.offset_y = 0
```

图 3.9 映射系统方程参数

但其实本设计的线性映射方法有一个不可忽视的缺点，由于红外摄像头与前置摄像头不可能放在眼球正前方，因为这样会遮挡视线，因此两个摄像头是有一定的角度和距离的。但问题是在此情况下线性映射只能对校正时的距离的垂直平面最准确，由于缺乏深度信息，无法对所有距离的对象进行准确的映射。

这个缺陷暂时无法有效解决，因此我在进行校正的程序中规定了一个折中的校正距离——1 米。

据我所知，解决此问题有两种方法：（1）增加一个红外摄像头获取另一只眼球瞳孔信息，根据深度知觉的双眼辐合原理，可以列出二元二次方程进行映射；（2）进行结构性改变，把反射镜设置在眼球正前方，配合两个摄像头，可同时获取正对眼球的眼球图像和场景图像，原理类似于单反相机。

3.3.3 映射系统的校准流程

映射校正系统分为视点位置测量程序与坐标映射关系分析程序两部分，具有先后关系。如图 3.10 所示。视点位置测量程序已整合到主程序 `RecvPupilDetMap`，还需要 `GetWinMousePos`，坐标映射关系分析程序为 MATLAB 程序 `MapParameter`。

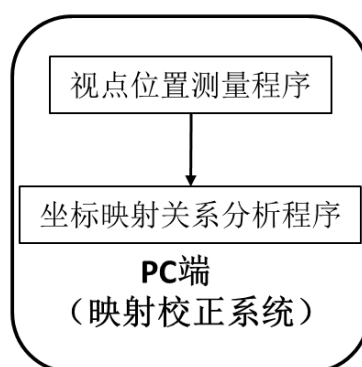


图 3.10 映射校正系统流程图

如前所述，映射校正系统在运行程序的同时，需要一系列的操作以得出视点线性映射方程的参数。

首先固定测试者的头部到适合水平高度，正对提供的校准图片并距离 1 米左右，先截取固定好头后的前置摄像头图像窗口。然后运行 `RecvPupilDetMap` 主程序，通过命令行的瞳孔坐标输出分别记录人眼看校准图片的九个点对应的瞳孔坐标，然后使用 `GetWinMousePos` 用移动鼠标到截图中的十字标标点，记录前面截图的前置摄像头画面的九个点的坐标，最后把 9 对瞳孔坐标和前置坐标输入 `MapParameter` 中，进行线性回归分析，得出线性映射方程的参数，供分析处理系统使用。

校正时的情景如图 3.11 所示。

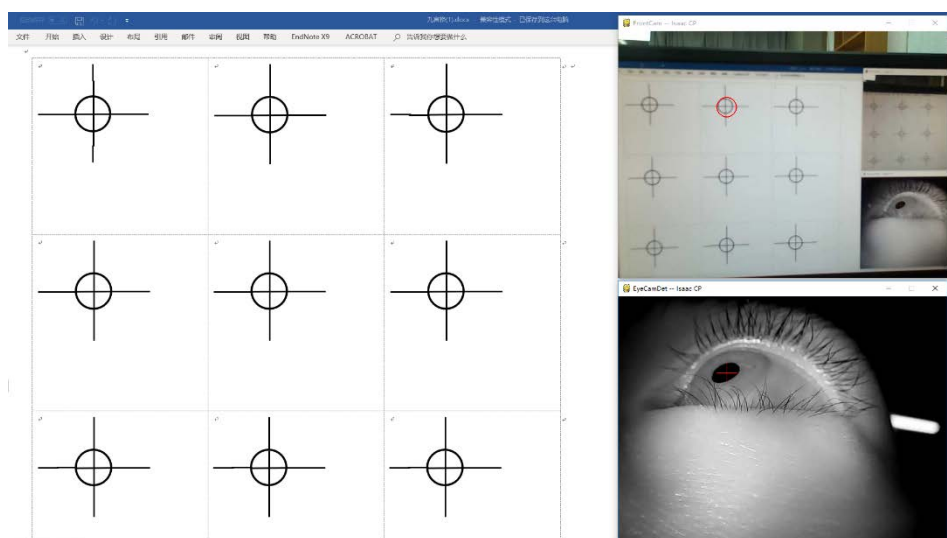


图 3.11 校正时的电脑屏幕截图

3.4 视点标记与显示

视点标记与显示所指的是眼动视频叠加程序和眼动视频播放程序。

在本设计中，使用 `pygame` 作为 GUI（图形用户界面）。眼动视频叠加程序的原理就是把前置图片放到 `pygame` 的 `surface` 缓存，再把获得的映射坐标用 `pygame.draw.circle` 方法画出标定圆，以直观地展示注视位置。眼动视频播放程序就是在循环中，每次获得新视频帧数据，就把缓存图片和标定圆加载到窗口上，以实现视频播放的效果。

具体如图 3.11 右方所示，为了简便使用两个独立的窗口用于演示，一个是红外摄像头画面，用于观察瞳孔检测是否正确；另一个是前置摄像头和标定圆画面，即真正的视频播放程序输出。

暂时仅能做到此效果。

3.5 本章小结

本章主要介绍了本设计中的重点算法研究，包括人眼结构与运动方式、瞳孔检测算法、视点坐标映射、视点标记与显示。

4 系统设计效果及测试分析

本章主要展示系统整体效果及验证瞳孔识别算法的效果。

4.1 本设计瞳孔定位算法测试

根据对各个方向的眼球图片进行瞳孔定位测试，在此进行展示，如图 4.1、4.2。

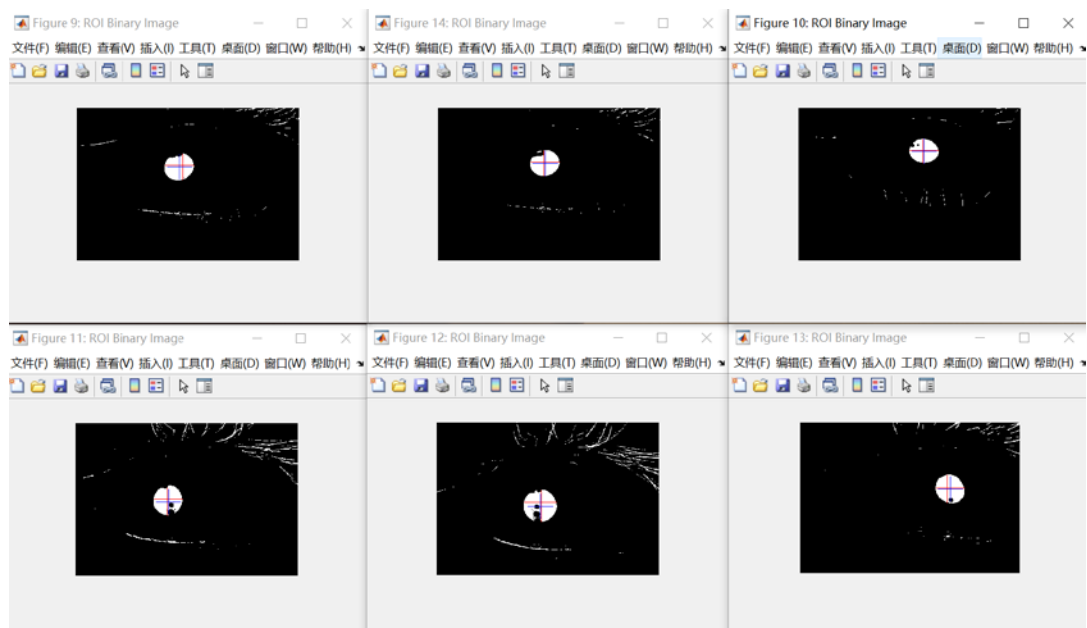


图 4.1 幅度较小的眼球图片瞳孔定位测试



图 4.2 幅度较大的眼球图片瞳孔定位测试

如图，红色线段为上述的最长横向线段与最长纵向线段，蓝色十字光标为推算出的瞳孔中心。可见除极端情况外，蓝色十字光标非常接近瞳孔中心，表明本设计的瞳孔定位算法具有相当的准确性。

4.2 眼镜式眼动仪整体设计效果

整体设计使用效果如图 4.3，所戴的眼镜为眼镜式眼动仪头戴部分，大显示屏中有红外摄像头画面的瞳孔检测监控窗口，和前置摄像头画面的眼动视频窗口；仔细看能看到左侧窗口中瞳孔中的十字光标与右侧窗口中的标定圆。



图 4.3 眼镜式眼动仪整体效果

4.3 本章小结

本章简要进行了系统整体效果及验证瞳孔识别算法的效果的展示。

结论

1 总结

眼动仪是一种能够跟踪测量眼球位置及眼球运动信息的设备^[2]。它应用场景广阔，可用于心理学、视觉认知、市场研究、人机交互、产品设计等领域，具有广阔的市场前景。

本设计介绍了基于树莓派的眼镜式眼动仪设计与实现。主要工作有：

(1) 介绍了眼镜式眼动仪的研究背景和意义，论述了国内外研究现状，介绍了眼动仪的分类。

(2) 详述了人眼结构与运动方式等基础知识。

(3) 通过查询相关文献、书籍等资料，设计眼镜式眼动仪的整体硬件和软件系统，进行了整体实现，并进行技术迭代。

(4) 重点讨论了瞳孔检测算法，起初使用了 Hough 圆检测算法，后改为使用自己研究的瞳孔检测算法。

(5) 分析传统的映射方法，本设计选择采用精简的线性映射方法，建立红外摄像头的瞳孔中心坐标与前置画面之间的坐标映射关系。

(6) 设计了一套校正映射方程的流程与软件方法。

(7) 测试了瞳孔检测的准确性并直观展现出来，并展示了整体设计的效果。

(8) 本设计的软件系统主要基于 OpenCV 类库，使用 Python 语言、MATLAB 语言编写。

2 展望

本设计完成了眼镜式眼动仪的软硬件系统的设计和实现，但本设计仍存在一些问题，希望能在未来的研究中有效解决。

(1) 本设计的红外摄像头与前置摄像头皆为手动调节焦距的摄像头，不能一直保证良好的聚焦，影响了瞳孔检测效率与前置画面清晰度。在未来的设计中考虑使用自动对焦的摄像头。

(2) 本设计使用的眼镜式眼动仪头戴部分使用乐高积木拼接而成，舒适性与定制性欠佳。在未来的设计中考虑使用 3D 打印的眼睛框架以获得更稳定的框架及定制性。

(3) 本设计中使用的是单眼瞳孔检测，缺乏对空间的深度信息获取，无法完美地映射到三维空间上的物体坐标。在未来的设计中考虑使用双眼的瞳孔检测以根据双眼辐合程度推断物体深度信息。

(4) 瞳孔检测算法虽然简介迅速，但仍无法检测闭眼的情况，对测试数据有较大的不良影响。在未来的设计中考虑使用基于边缘检测的方法检测眼睛闭合的情形。

(5) 映射系统的线性映射方法并不能完美地运行在三维空间中，现在的情况只是校正时折中地校正 1 米的距离。在未来的设计中考虑使用二次映射的方程结合双眼的瞳孔检测以更准确地映射到场景的目标上。

(6) 界面的设计不美观，GUI 没有按钮。未来可以增加美观及实用程度。

(7) 使用 Python 作为开发语言虽然效率高，但是运行速度相对慢不少。未来计划针对重点代码进行优化，或使用别的语言重写。

参考文献

- [1] Robert J K Jacob, Keith S Kam. Eye tracking in human computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2003; 24: 682~701
- [2] Cheng J C K , Li L . Effects of reference objects and extra-retinal information about pursuit eye movements on curvilinear path perception from retinal flow[J]. Journal of Vision, 2012, 12(3):12-12.
- [3] 赵新灿, 左洪福, 任勇军. 眼动仪与视线跟踪技术综述%A Review of Eye Tracker and Eye Tracking Techniques[J]. 计算机工程与应用, 2006, 042(012):118-120,140.
- [4] 张丽川, 李宏汀, 葛列众. Tobii 眼动仪在人机交互中的应用[J]. 人类工效学, 2009, 015(002):67-69,39.
- [5] 刘奇岳. 眼动仪在教育研究中的应用现状分析%An Analysis of the Application of Eye Tracker in Educational Research[J]. 软件导刊, 2019, 018(006):135-137,142.
- [6] 许鸿飞, 高文君. 交互设计中眼动仪的可用性研究[J]. 科技传播, 2017, 009(022):145-146.
- [7] 郭锐. 一种新型眼动仪准确性的初步研究[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(1):43-46.
- [8] 张森, 李京诚, 徐守森, 等. 眼动仪的开发现状及其在运动心理领域的应用[J]. 首都体育学院学报, 2007(02):49-51+54.
- [9] 卞迁, 齐薇, 刘志方, 闰国利. 当代眼动记录技术述评[J]. 心理研

究, 2009, 2(1):34-37.

[10] 徐娟. 眼动仪的发展和性能比较[J]. 中国现代教育装备, 2012, (23):16-18.

[11] 闫国利, 田宏杰. 眼动记录技术与方法综述[J]. 应用心理学, 2004(02):57-60.

[12] 罗国良, 吕冰, 李天航. 眼动仪的现状及其在技术进化中的应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 054(003):78-80.

[13] 许帅. 托架式眼动仪的设计及算法研究[D].

[14] 蔡国松, 卢广山, 王合龙. 眼跟踪技术 %Eye tracking technology[J]. 电光与控制, 2004, 011(001):71-73.

[15] 郭北苑, 方卫宁. Input Technique Based on Eyemark in Human-computer Interaction%人机交互中基于眼动仪的输入技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 025(0z1):55-57.

[16] 姜慧慧. 头盔式眼动仪头动检测方法的研究与应用[J]. 图象识别与自动化, 1999(1):27-30.

[17] Mantiuk R , Kowalik M , Nowosielski A , et al. Do-It-Yourself Eye Tracker: Low-Cost Pupil-Based Eye Tracker for Computer Graphics Applications[J]. 2012.

[18] 蜗牛 Running. 人眼的构造及其功能 [DB/OL]. <https://blog.csdn.net/mapeng892020/article/details/40040383>, 2014-10-13.

[19] 徐洁. 心理实验室中眼动仪的原理与应用[J]. 实验室科学, 2009(3):162-163.

- [20] JakobNielsen, KaraPernice. 用眼动追踪提升网站可用性[M]. 电子工业出版社, 2011.
- [21] 麦伟强. 浅谈头戴式眼动仪的设计[J]. 数字技术与应用, 2012, 000(010):P.161-162.
- [22] Andrew T Copola. Idiosyncratic characteristics of saccadic eye movement when viewing diferent visual environments[J]. Vision Research, 1999; 39: 2947~2953
- [23] 周家斌. 眼动跟踪系统设计. 西安电子科技大学硕士论文. 2010.
- [24] AlexBradbury, BenEverard. 树莓派 Python 编程指南[M]. 机械工业出版社, 2015.
- [25] 程国钢. 树莓派就这么玩[M]. 电子工业出版社, 2015.
- [26] Duchowski. 眼动跟踪技术:原理与应用[M]. 科学出版社, 2015.
- [27] 刘遑. Linux 就该这么学[M]. 人民邮电出版社, 2017.
- [28] 闫国利, 白学军. 眼动研究心理学导论:揭开心灵之窗奥秘的神奇科学[M]. 科学出版社, 2012.