

文章编号: 2095-2163(2022)02-0037-07

中图分类号: TP274

文献标志码: A

# 眼球突出度的双目视觉测量

李帮建

(奥佳华瑞(厦门)医疗科技有限公司, 福建 厦门 361008)

**摘要:** 为了提高眼球突出度测量方法的效率和安全性,基于双目视觉测量原理,提出一种特征点均通过图像处理获取的眼球突出度测量方法。该方法首先获取眼部图像,再利用 MediaPipe Iris 获取虹膜中心,结合阈值分割、轮廓检测获取标记点,最后计算眼球突出度值。为了验证本文双目视觉测量方法的精密度和准确度,搭建了测试平台,针对标准件、头部模型和真人,分别进行不同状态下的测试。实验结果表明,本文方法的精密度为 0.696 3 mm,准确度为 0.845 4 mm。

**关键词:** 双目视觉; 图像处理; 测量; 眼球突出度

## Binocular vision measurement of exophthalmos

LI Bangjian

(Oray (Xiamen) Medical Technology Co., Ltd., Xiamen Fujian 361008, China)

**[Abstract]** In order to improve the efficiency and safety of exophthalmos measurement methods, based on the principle of binocular vision measurement, a method for exophthalmos measurement in which the characteristic points are acquired through image processing is proposed. First, the images of eyes are collected. Then, MediaPipe Iris is used to obtain the center of the iris combined with threshold segmentation and contour detection to obtain the markers. Finally, the exophthalmos is calculated. In order to verify the precision and accuracy of the binocular vision measurement method in the paper, a test platform is built to test the standard part, head model and real person under different conditions. The experimental results show that the precision of the binocular vision measurement method in this paper is 0.696 3 mm and the accuracy is 0.845 4 mm.

**[Key words]** binocular vision; image processing; measurement; exophthalmos

## 0 引言

甲状腺相关眼病是最常见的眼眶疾病,因其病程长(持续时间通常为 25 年),损伤组织结构多,症状、体征复杂,治疗效果欠佳,而备受关注<sup>[1]</sup>。中国甲状腺相关眼病的患病率为 0.1%~0.3%。准确地诊断甲状腺相关眼病,必须了解甲状腺相关眼病的临床表现,包括症状和体征、影像学检查和辅助检查等。眼球突出,即眼球向前突出,是甲状腺相关眼病中第二常见的体征,可影响 40%~70%的甲状腺相关眼病患者。眼球突出主要是眼眶脂肪和(或)肌肉膨大所致,即由于眼睑存在相对致密的睑板-韧带隔膜,限制扩张的眼眶组织前移,而推压眼球向前突出。甲状腺相关眼病 80%~90%双眼都会发生眼球突出,可以是不对称的,或者仅单眼突出。眼球突出的判断依赖于眼球突出程度的准确测量和正常突出度的上限参考值<sup>[2]</sup>。中国汉族人口的眼球突出度正常上限是 19 mm。针对不同人种的眼球突出差异,眼球突出被定义为个体的眼球突出度增加至少

2 mm。

目前,眼球突出度的常见测量方法有 Hertel 眼球突出计测量方法和 CT 测量方法<sup>[3]</sup>。Hertel 眼球突出计测量方法需要测试者与被测试者近距离相对而坐进行测量,该方法测量效率低(两只眼睛需要分别测量),且对测试者要求高(测试者需避免用力下压患者眼球,需调整观察角度进行读数,需调整头的姿态并保证 Hertel 眼球突出计静止)。CT 测量方法需要进行颅脑连续扫描,并进行图像重建。测试者选取眼眶轴位图像,通过人机交互测量眼球突出度值。该方法测量结果的影响因素有眶周软组织、测量体位变化、头颅活动等,此外与测量平面、窗宽、窗位等具体计算过程有关。该方法使用价格高且有辐射风险。

三维视觉测量技术是结合计算机视觉和精密测量的先进高端技术<sup>[4]</sup>。随着计算机和视觉技术的发展,三维视觉测量已形成成熟的理论基础,且已广泛应用于科学研究、医学诊断、逆向工程、刑事侦查、在线检测、质量控制、智慧城市和高端装备制造等领

**基金项目:** 代谢病智慧医疗器械产业化项目(ORCP00401)。

**作者简介:** 李帮建(1989-),男,博士,工程师,主要研究方向:机器视觉、图像处理。

**收稿日期:** 2021-10-22

域<sup>[5-7]</sup>。双目视觉测量是三维视觉测量技术中被动视觉测量方法的一种。近来,有研究者提出利用双目视觉测量眼球突出度,具体地,利用双目相机获取图像,通过标定、利用霍夫变换定位角膜中心点(颞侧骨性点通过人工手动选择)、利用 SURF 特征描述子获取左右视图特征点且利用 RANSAC 算法筛选,完成立体匹配、计算三维位置信息和眼球突出度值<sup>[8]</sup>。目前该方法的测量结果不稳定,相对误差为 0.3%~68.3%。为了使眼球突出度的双目视觉测量方法测量结果更稳定,在本文的双目视觉测量法中,颞侧骨性点和角膜中心点均采用图像处理方法获得。为了验证本文双目视觉测量方法的精密度和准确度,搭建了实验平台,采集了不同对象的双目图像,计算获得不同状态下的眼球突出度,实验结果表明,本文双目视觉测量方法的测量结果具有较高的稳定性。

## 1 眼球突出度及其测量方法

眼球突出度的计算示意如图 1 所示。 $A$ 、 $A'$  表示角膜顶点; $B$ 、 $B'$  表示颞侧骨性点; $BB'$  为颞侧骨性点连线; $AQ$ 、 $A'Q'$  为角膜顶点到颞侧骨性点连线的垂直距离,该距离为左、右眼的眼球突出度值。

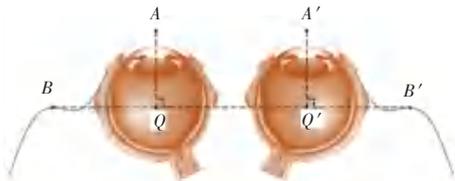


图 1 眼球突出度计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of exophthalmos calculation

本文中,眼球突出度采用双目视觉测量方法获得。如图 2 所示。眼球突出度的双目视觉测量步骤如下:

- (1) 利用双目相机采集被测试者眼部图像,如图 3(a)、3(b) 所示;
- (2) 结合标定信息对图像进行校正,校正结果如图 3(c)、3(d) 所示;
- (3) 利用图像处理方法识别图 3(c) 中的角膜顶点和颞侧骨性点,如图 3(e) 所示;
- (4) 利用匹配算法<sup>[9]</sup> 获得图 3(d) 中角膜顶点和颞侧骨性点,如图 3(f) 所示;
- (5) 利用视差原理<sup>[10-11]</sup> 可获得对应特征点(角膜顶点和颞侧骨性点)的空间三维坐标;

(6) 结合图 1 计算左、右眼的眼球突出度值。

图 3(e)、图 3(f) 中,十字星表示角膜顶点、六角星表示颞侧骨性点。



图 2 眼球突出度的双目视觉测量流程图

Fig. 2 Flow chart of binocular vision measurement of the exophthalmos

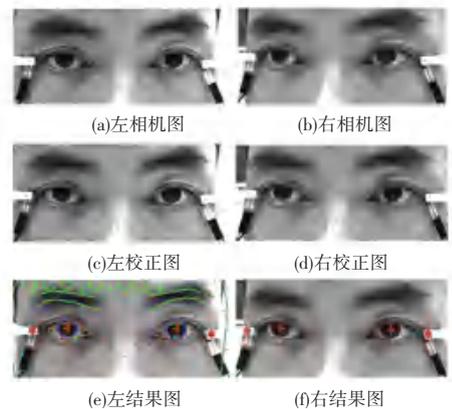


图 3 眼球突出度双目视觉测量中间过程图

Fig. 3 Images of intermediate process of binocular vision measurement of the exophthalmos

本文中,人眼角膜顶点使用 MediaPipe Iris<sup>[12]</sup> 获取的虹膜中心代替。如图 4 所示,颞侧骨性点图像处理识别步骤如下:

- (1) 使用 MediaPipe Iris 获取人眼位置,如图 5(a) 所示;
- (2) 根据人眼位置,绘制颞侧骨性点所在区域,如图 5(b) 所示;
- (3) 利用阈值分割<sup>[13]</sup>,获取颞侧骨性点标记点区域,如图 5(c) 中白色区域;

- (4) 利用轮廓检测<sup>[14]</sup>, 获取颞侧骨性点的轮廓;
- (5) 轮廓中心为颞侧骨性点。如图 5(d) 中, 六角星表示颞侧骨性点。



图 4 颞侧骨性点图像处理流程图

Fig. 4 Flow chart of image processing of temporal bony spot

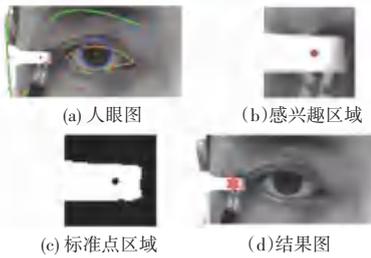


图 5 颞侧骨性点图像处理中间过程图

Fig. 5 Images of intermediate process of image processing of temporal bony spot

## 2 实验与结果分析

实验搭建了双目视觉测量系统, 首先, 对双目系统进行立体标定, 得到相机的内外参数; 其次, 根据双目视觉视差原理, 得到眼球突出度特征点的三维坐标; 最后, 利用特征点的三维空间位置计算眼球突出度值。

### 2.1 双目相机的立体标定

实际应用中, 双目相机及镜头不可能做到理想对齐, 为了修正镜头的偏差和相机安装偏差, 同时获取相机的参数, 需对双目相机进行标定和立体校正。本文采用中科融合感知智能研究院(苏州工业园区)有限公司提供的相机标定软件进行标定, 标定模板为 GRB200-11 \* 9 圆点标定板(黑底白点), 如图 6(a) 所示, 具体参数见表 1。



图 6 实验平台

Fig. 6 Experiment platform

表 1 标定板参数

Tab. 1 Parameters of calibration board

| 尺寸      | 图像大小        | 大圆直径 | 小圆直径 | 中心距 | 精度   | mm |
|---------|-------------|------|------|-----|------|----|
| 200×150 | 157.5×127.5 | 12   | 7.5  | 15  | 0.01 |    |

本文中, 相机标定得到的参数为:

$$M_R = \begin{bmatrix} \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 280.725 & 2 & 0.000 & 0 & 660.653 & 3 \\ 0.000 & 0 & 1 & 280.830 & 0 & 514.818 & 2 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 & \hat{e} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_T = \begin{bmatrix} \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 294.403 & 3 & 0.000 & 0 & 648.660 & 2 \\ 0.000 & 0 & 1 & 294.859 & 1 & 504.220 & 5 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.000 & 0 & \hat{e} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$D_R = [-0.072 \ 1 \ 0.076 \ 2 \ -0.000 \ 1 \ 0.000 \ 3 \ 0.000 \ 0] \quad (3)$$

$$D_T = [-0.076 \ 6 \ 0.095 \ 8 \ 0.000 \ 2 \ -0.000 \ 2 \ 0.000 \ 0] \quad (4)$$

$$R = \begin{bmatrix} \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \\ \hat{e} & \hat{e} & \hat{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.948 & 3 & 0.005 & 0 & 0.317 & 3 \\ -0.007 & 8 & 0.999 & 9 & 0.007 & 4 \\ -0.317 & 3 & -0.009 & 5 & 0.948 & 3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T = [-60.997 \ 3 \ 0.538 \ 1 \ 13.073 \ 4]^T \quad (6)$$

式中,  $M_R$  和  $M_T$  分别为左右相机的内参矩阵;  $D_R$  和  $D_T$  分别为左右相机的畸变参数;  $R$  和  $T$  分别为右相机相对于左相机的旋转矩阵和平移矩阵<sup>[15]</sup>。

### 2.2 实验平台及双目数据

搭建的实验平台如图 6(b) 所示, 相机与头部支架的距离约为 30 cm, 符合眼科检测设备的一般应用场景距离<sup>[16]</sup>。如图 6(c) 所示, 头部支架通过额托、颌托固定头部姿态, 此外设计的卡具可以精准定位颞侧骨性点。双目相机使用海康相机搭建, 如图 6(d) 所示。

实验采集了不同对象的图像,如图7所示。为了验证整体精度,标准件静止和移动后状态各采集5组图像;头部模型(含角膜标记点)静止和移动后状态各采集5组图像;头部模型(不含角膜标记点)静止和移动后状态各采集5组图像;真人(含角膜标记点)静止和移动后状态各采集5组图像;真人(不含角膜标记点)静止和正常测试状态各采集5组图像,共采集50组图像。

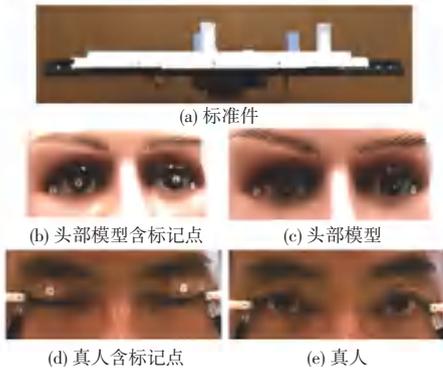


图7 采集的图像

Fig. 7 Captured images

## 2.3 实验结果

### 2.3.1 标准件

标准件如图6(e)所示,共有4个标记点,从左到右依次为颞侧骨性点1、角膜顶点1(类似右眼)、角膜顶点2(类似左眼)和颞侧骨性点2。双目相机采集的图像如图7(a)所示。标准件的实际尺寸如图8所示,其中眶距为左右颞侧骨性点的连线距离,瞳距为左右眼角膜顶点的连线距离。标准件保持静止状态采集5组图像,各标记点识别方法参考颞侧骨性点图像识别方法,具体测量结果见表2。

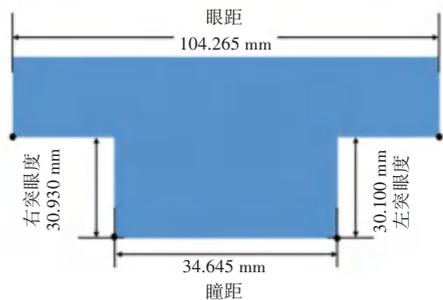


图8 标准件实际尺寸示意图

Fig. 8 Schematic diagram of actual size of standard part

表2 标准件静止状态测量结果

Tab. 2 Measurement results of standard part in static state mm

| 次数    | 左突眼度           | 右突眼度           | 眶距             | 瞳距             |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1     | 29.956 2       | 30.554 7       | 104.486 2      | 34.802 3       |
| 2     | 29.956 2       | 30.554 7       | 104.486 2      | 34.802 3       |
| 3     | 29.948 6       | 30.554 7       | 104.486 2      | 34.620 2       |
| 4     | 29.956 2       | 30.554 7       | 104.486 2      | 34.802 3       |
| 5     | 29.948 6       | 30.554 7       | 104.486 2      | 34.620 2       |
| 均值    | 29.953 2       | 30.554 7       | 104.486 2      | 34.729 5       |
| 标准差   | <b>0.003 7</b> | 0.000 0        | 0.000 0        | <b>0.089 2</b> |
| 真值    | 30.100         | 30.930         | 104.265        | 34.645         |
| 均方根误差 | 0.146 9        | <b>0.375 3</b> | <b>0.221 2</b> | 0.122 8        |

标准差  $\sigma$  的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (7)$$

其中,  $N$  表示样本数量;  $x_i$  表示第  $i$  个样本值;  $\mu$  表示样本的平均值。

标准差可以反映样本数据的离散程度,即可以度量本文数据的精密度。均方根误差  $E_{\text{RMS}}$  可以反映样本数据的准确度,其计算公式为:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X)^2}{N}} \quad (8)$$

其中,  $X$  表示样本的真值。

从表2可以得出,对于标准件静止状态时,眼球突出度的标准差最大值为0.003 7 mm,均方根误差最大值为0.375 3 mm;眶距的均方根误差为0.221 2 mm;瞳距的标准差为0.089 2 mm,均方根误差为0.122 8 mm。存在标准差和均方根误差,说明特征点的图像识别方法存在一定误差。

标准件移动到5个不同位置后采集图像,具体测量结果见表3。从表3可以得出,对于标准件移动后测量时,眼球突出度的标准差最大值为0.467 0 mm;均方根误差最大值为0.631 3 mm;眶距的标准差为0.130 2 mm,均方根误差为0.305 8 mm;瞳距的标准差为0.220 8 mm;均方根误差为0.238 3 mm。比较表3和表2,移动后测量结果的标准差和均方根误差均比静止状态大,说明移动到不同位置后,图像识别方法同样存在一定误差。原因

是不同位置处的光照等外界环境不同。

表 3 标准件移动后测量结果

Tab. 3 Measurement results of standard part after moved mm

| 次数    | 左突眼度           | 右突眼度           | 眶距             | 瞳距             |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1     | 30.733 2       | 29.808 8       | 104.464        | 34.135         |
| 2     | 30.871 6       | 30.778 8       | 104.799 4      | 34.724 6       |
| 3     | 30.687 8       | 30.970 5       | 104.468 5      | 34.565 7       |
| 4     | 30.213 6       | 30.205 1       | 104.463 4      | 34.743 9       |
| 5     | 30.898 9       | 30.989 5       | 104.513 3      | 34.607 6       |
| 均值    | 30.681 0       | 30.550 5       | 104.541 7      | 34.555 4       |
| 标准差   | 0.247 0        | <b>0.467 0</b> | <b>0.130 2</b> | <b>0.220 8</b> |
| 真值    | 30.100         | 30.930         | 104.265        | 34.645         |
| 均方根误差 | <b>0.631 3</b> | 0.601 8        | <b>0.305 8</b> | <b>0.238 3</b> |

### 2.3.2 头部模型实验

头部模型如图 6(f) 所示,共有 4 个标记点,从左到右依次为颞侧骨性点 1、角膜顶点 1(右眼)、角膜顶点 2(左眼)和颞侧骨性点 2。双目相机采集的图像如图 7(b) 所示。头部模型保持静止状态采集 5 组图像,各标记点识别方法参考颞侧骨性点图像识别方法,具体测量结果见表 4。因头部模型各项的真值不易获得,表 4 中未给出真值和均方根误差值。从表 4 可以得出,对于头部模型静止状态时,眼球突出度的标准差最大值为 0.281 8 mm;眶距的标准差为 0.041 5 mm;瞳距的标准差为 0.000 7 mm。

表 4 头部模型静止状态测量结果

Tab. 4 Measurement results of head model in static state mm

| 次数  | 左突眼度     | 右突眼度           | 眶距             | 瞳距             |
|-----|----------|----------------|----------------|----------------|
| 1   | 11.357 5 | 11.624 7       | 92.171 7       | 62.272 4       |
| 2   | 11.201 8 | 10.917 3       | 92.076 1       | 62.273 6       |
| 3   | 11.323 9 | 11.620 9       | 92.181 8       | 62.274 2       |
| 4   | 11.323 9 | 11.620 9       | 92.181 8       | 62.274 2       |
| 5   | 11.323 9 | 11.620 9       | 92.181 8       | 62.274 2       |
| 均值  | 11.306 2 | 11.480 9       | 92.158 6       | 62.273 7       |
| 标准差 | 0.053 8  | <b>0.281 8</b> | <b>0.041 5</b> | <b>0.000 7</b> |

头部模型移动到 5 个不同位置后采集图像,具体测量结果见表 5。表 5 中的真值为表 4 中的平均值。从表 5 可以得出,对于头部模型移动后测量时,眼球突出度的标准差最大值为 0.344 8 mm,均方根误差最大值为 0.391 3 mm;眶距的标准差为 0.086 0 mm,均方根误差为 0.088 0 mm;瞳距的标准

差为 0.046 8 mm,均方根误差为 0.047 2 mm。比较表 5 和表 3,头部模型测量结果的均方根误差均比标准件的大,原因是两组数据的真值来源不同。

表 5 头部模型移动后测量结果

Tab. 5 Measurement results of head model after moved mm

| 次数    | 左突眼度           | 右突眼度     | 眶距             | 瞳距             |
|-------|----------------|----------|----------------|----------------|
| 1     | 11.775 1       | 10.954 2 | 92.175 5       | 62.221 4       |
| 2     | 10.991 4       | 11.050 2 | 92.150 8       | 62.246 4       |
| 3     | 10.937 3       | 11.365 7 | 92.321 0       | 62.288 9       |
| 4     | 11.121 5       | 11.750 7 | 92.185 6       | 62.230 2       |
| 5     | 10.780 3       | 11.062 3 | 92.052 5       | 62.348 2       |
| 均值    | 11.121 1       | 11.236 6 | 92.177 1       | 62.267 0       |
| 标准差   | <b>0.344 8</b> | 0.291 8  | <b>0.086 0</b> | <b>0.046 8</b> |
| 真值    | 11.306 2       | 11.480 9 | 92.158 6       | 62.273 7       |
| 均方根误差 | <b>0.391 3</b> | 0.380 6  | <b>0.088 0</b> | <b>0.047 2</b> |

针对头部模型,去掉两角膜顶点的标记点。双目相机采集的图像如图 7(c) 所示。头部模型保持静止状态采集 5 组图像,其中角膜顶点使用 MediaPipe Iris 获取的虹膜中心代替,具体测量结果见表 6。从表 6 可以得出,对于头部模型静止状态时,眼球突出度的标准差最大值为 0.490 6 mm;眶距的标准差为 0.118 6 mm;瞳距的标准差为 0.119 3 mm。比较表 6 和表 4,头部模型(无角膜顶点标记点)测量结果中,眼球突出度的标准差比头部模型(有角膜顶点标记点)的大,原因是 MediaPipe Iris 获取的虹膜中心有一定误差;此外,头部模型(无角膜顶点标记点)测量结果中,眼球突出度和瞳距的平均值均比头部模型(有角膜顶点标记点)的小,原因是角膜顶点标记点的位置和 MediaPipe Iris 获取的虹膜中心的位置不同。

表 6 头部模型(无角膜顶点标记点)静止状态测量结果

Tab. 6 Measurement results of head model without corneal markers in static state mm

| 次数  | 左突眼度           | 右突眼度    | 眶距             | 瞳距             |
|-----|----------------|---------|----------------|----------------|
| 1   | 7.709 6        | 7.483 3 | 92.261 0       | 60.113 1       |
| 2   | 6.975 3        | 7.154 2 | 92.562 2       | 59.984 2       |
| 3   | 8.139 4        | 7.198 0 | 92.263 1       | 60.239 7       |
| 4   | 7.457 0        | 8.148 1 | 92.247 0       | 59.886 1       |
| 5   | 6.785 0        | 6.764 2 | 92.355 4       | 60.041 7       |
| 均值  | 7.413 3        | 7.349 6 | 92.337 7       | 60.053 0       |
| 标准差 | <b>0.490 6</b> | 0.460 3 | <b>0.118 6</b> | <b>0.119 3</b> |

头部模型(无角膜顶点标记点)移动到5个不同位置后采集图像,具体测量结果见表7。表7中的真值为表6中的平均值。从表7可以得出,对于头部模型移动后测量时,眼球突出度的标准差最大值为0.696 3 mm,均方根误差最大值为0.845 4 mm;眶距的标准差为0.080 8 mm,均方根误差为0.220 7 mm;瞳距的标准差为0.218 5 mm,均方根误差为0.229 5 mm。

表7 头部模型(无角膜顶点标记点)移动后测量结果

Tab. 7 Measurement results of head model without corneal markers after moved mm

| 次数    | 左突眼度           | 右突眼度    | 眶距             | 瞳距             |
|-------|----------------|---------|----------------|----------------|
| 1     | 6.864 5        | 8.122 7 | 92.169 1       | 59.621 4       |
| 2     | 7.506 3        | 7.524 0 | 92.072 0       | 59.888 9       |
| 3     | 7.963 3        | 6.698 3 | 92.072 0       | 60.261 5       |
| 4     | 8.958 0        | 6.604 8 | 92.072 0       | 60.016 1       |
| 5     | 8.171 7        | 7.121 9 | 92.275 2       | 60.126 0       |
| 均值    | 7.892 8        | 7.214 3 | 92.132 1       | 59.982 8       |
| 标准差   | <b>0.696 3</b> | 0.559 9 | <b>0.080 8</b> | <b>0.218 5</b> |
| 真值    | 7.413 3        | 7.349 6 | 92.337 4       | 60.053 0       |
| 均方根误差 | <b>0.845 4</b> | 0.576 0 | <b>0.220 7</b> | <b>0.229 5</b> |

### 2.3.3 真人实验

双目相机采集的图像如图7(d)所示(真人闭眼且贴有角膜顶点标记点)。共有4个标记点,从左到右依次为颞侧骨性点1、角膜顶点1(右眼)、角膜顶点2(左眼)和颞侧骨性点2。真人保持静止状态采集5组图像,各标记点识别方法参考颞侧骨性点图像识别方法,具体测量结果见表8。因真人各项的真值不易获得,表8中也未给出真值和均方根误差值。从表8可以得出,对于真人静止状态时,眼球突出度的标准差最大值为0.269 9 mm;眶距的标准差为0.017 9 mm;瞳距的标准差为0.203 4 mm。

表8 真人静止状态测量结果

Tab. 8 Measurement results of real person in static state mm

| 次数  | 左突眼度           | 右突眼度     | 眶距             | 瞳距             |
|-----|----------------|----------|----------------|----------------|
| 1   | 12.210 3       | 10.896 4 | 116.258 0      | 77.453 8       |
| 2   | 11.945 6       | 10.747 2 | 116.258 0      | 77.648 4       |
| 3   | 11.945 6       | 10.680 5 | 116.258 0      | 77.854 6       |
| 4   | 12.585 4       | 10.705 0 | 116.295 0      | 77.856 9       |
| 5   | 12.506 1       | 10.743 1 | 116.295 0      | 78.048 1       |
| 均值  | 12.238 6       | 10.754 4 | 116.273 0      | 77.772 4       |
| 标准差 | <b>0.269 9</b> | 0.075 2  | <b>0.017 9</b> | <b>0.203 4</b> |

真人移动到5个不同位置后采集图像,具体测量结果见表9。表9中的真值为表8中的平均值。

从表9可以得出,对于真人移动后测量时,眼球突出度的标准差最大值为0.388 0 mm,均方根误差最大值为0.486 1 mm;眶距的标准差为0.057 8 mm,均方根误差为0.072 6 mm;瞳距的标准差为0.212 5 mm,均方根误差为0.238 8 mm。

针对真人实验,去掉两角膜顶点的标记点。双目相机采集的图像如图7(e)所示(真人睁开眼且不贴角膜标记点)。真人保持静止状态采集5组图像,其中角膜顶点使用MediaPipe Iris获取的虹膜中心代替,具体测量结果见表10。从表10可以得出,对于真人静止状态时,眼球突出度的标准差最大值为0.474 2 mm;眶距的标准差为0.132 7 mm;瞳距的标准差为0.177 6 mm。

表9 真人移动后测量结果

Tab. 9 Measurement results of real person after moved mm

| 次数    | 左突眼度           | 右突眼度     | 眶距             | 瞳距             |
|-------|----------------|----------|----------------|----------------|
| 1     | 12.803 0       | 10.867 4 | 116.258 0      | 77.687 3       |
| 2     | 11.773 7       | 10.674 5 | 116.258 0      | 77.438 8       |
| 3     | 12.568 5       | 10.688 5 | 116.114 0      | 77.402 3       |
| 4     | 12.791 6       | 10.782 1 | 116.258 0      | 77.891 7       |
| 5     | 12.720 5       | 10.662 6 | 116.258 0      | 77.896 8       |
| 均值    | 12.531 5       | 10.735 0 | 116.229 0      | 77.663 4       |
| 标准差   | <b>0.388 0</b> | 0.078 5  | <b>0.057 8</b> | <b>0.212 5</b> |
| 真值    | 12.238 6       | 10.754 4 | 116.273 0      | 77.772 4       |
| 均方根误差 | <b>0.486 1</b> | 0.080 9  | <b>0.072 6</b> | <b>0.238 8</b> |

表10 真人(无角膜标记点)静止状态测量结果

Tab. 10 Measurement results of real person without corneal markers in static state mm

| 次数  | 左突眼度    | 右突眼度           | 眶距             | 瞳距             |
|-----|---------|----------------|----------------|----------------|
| 1   | 7.013 2 | 6.823 1        | 116.066 4      | 68.582 5       |
| 2   | 5.993 8 | 5.798 2        | 116.066 4      | 68.418 5       |
| 3   | 6.812 5 | 7.012 9        | 116.337 3      | 68.944 3       |
| 4   | 6.645 9 | 6.942 2        | 116.337 3      | 68.586 9       |
| 5   | 6.902 2 | 6.208 7        | 116.066 4      | 68.520 5       |
| 均值  | 6.673 5 | 6.557 0        | 116.174 8      | 68.610 5       |
| 标准差 | 0.360 5 | <b>0.474 2</b> | <b>0.132 7</b> | <b>0.177 6</b> |

真人(无角膜标记点)移动到5个不同位置后采集图像,具体测量结果见表11。表11中的真值为表10中的平均值。从表11可以得出,对于真人(无角膜标记点)移动后测量时,眼球突出度的标准差最大值为0.645 4 mm,均方根误差最大值为0.689 1 mm;眶距的标准差为0.144 5 mm,均方根误差为0.160 8 mm;瞳距的标准差为0.206 8 mm,均方根误差为0.207 6 mm。

表 11 真人(无角膜标记点)移动后测量结果

Tab. 11 Measurement results of real person without corneal markers after moved

| 次数    | mm             |                |                |                |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       | 左突眼度           | 右突眼度           | 眶距             | 瞳距             |
| 1     | 6.332 7        | 5.963 8        | 116.077 1      | 68.937 4       |
| 2     | 7.018 7        | 6.313 6        | 116.386 4      | 68.521 3       |
| 3     | 5.955 7        | 5.458 2        | 116.386 1      | 68.321 7       |
| 4     | 7.850 7        | 6.160 0        | 116.311 3      | 68.679 1       |
| 5     | 6.804 3        | 7.330 2        | 116.066 4      | 68.498 1       |
| 均值    | 6.792 4        | 6.245 2        | 116.245 5      | 68.591 5       |
| 标准差   | <b>0.645 4</b> | 0.614 5        | <b>0.144 5</b> | <b>0.206 8</b> |
| 真值    | 6.673 5        | 6.557 0        | 116.174 8      | 68.610 5       |
| 均方根误差 | 0.656 3        | <b>0.689 1</b> | <b>0.160 8</b> | <b>0.207 6</b> |

### 3 结束语

本文研究了双目视觉测量眼球突出度。双目视觉测量方法较 Hertel 眼球突出计测量方法效率更高,较 CT 测量方法无辐射更安全。为了评估双目视觉测量方法的精密度和准确度,搭建了实验平台,并针对不同对象和不同状态,采集了双目图像。实验结果表明,对于标准件,精密度为 0.467 0 mm,准确度为 0.631 3 mm;对于头部模型,精密度为 0.696 3 mm,准确度为 0.8454 mm;对于真人实验,精密度为 0.645 4 mm,准确度为 0.689 1 mm。真人实验的精密度和准确度比标准件均低,下一步需深入研究角膜顶点图像处理识别算法。

### 参考文献

[1] 高琪,周欢娣,韩雪涛,等. 甲状腺相关眼病预后因素及治疗的

研究进展[J]. 眼科新进展, 2021, 41(7): 696-700.

- [2] 魏锐利,程金伟. 甲状腺相关眼病[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 28-40.
- [3] 檀思蕾,陈捷敏,俞晓英,等. 眼球突出度测量方法的比较及其法医学意义[J]. 法医学杂志, 2017, 33(4): 353-356.
- [4] 张宗华,刘巍,刘国栋,等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(6): 1483-1502.
- [5] 刘明德,王江. 基于双目视觉的药房机器人局部避障控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2021, 44(18): 177-181.
- [6] 常子霆,施雨晴,王俊,等. 基于双目视觉的车辆速度测量方法[J]. 计算机科学, 2021, 48(9): 135-139.
- [7] 于洁潇,张美琪,苏育挺. 基于双目视觉的三维车辆检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 0215004.
- [8] 张帅. 基于双目立体视觉的眼球突出度测量方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 20-47.
- [9] 陆玮,刘翔,薛冕. 基于超像素分割的孪生网络双目立体匹配方法研究[J]. 电子科技, 2021, 34(9): 73-78.
- [10] 卢荣胜,史艳琼,胡海兵. 机器人视觉三维成像技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 040001.
- [11] 邓烈刚,李文峰,杨雁南. 基于双目机器视觉的高精度激光充电瞄准系统[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1415006.
- [12] Artsiom A, Andrey V, Ivan G, et al. Real-time pupil tracking from monocular video for digital puppetry[EB/OL]. (2020-06-19)[2021-10-28]. <http://arxiv.org/abs/2006.11341>.
- [13] 拉斐尔·冈萨雷斯,理查德·布伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京: 电子工业出版社, 2020: 502-572.
- [14] 安德里安·凯勒,加里·布拉德斯基. 学习 OpenCV 3[M]. 阿丘科技,刘昌祥,吴雨培,等,译. 北京: 清华大学出版社, 2019: 359-384.
- [15] 韩俊杰,骆开庆,邱健,等. 基于双目相机的眼动仪头部姿态估计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 1410022.
- [16] 吕帆. 眼视光器械学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 108-122.

(上接第 36 页)

- [6] SOCHER R, HUVAL B, MANNING C D, et al. Semantic compositionality through recursive matrix-vector spaces[C]// Proceedings of the 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning, Association for Computational Linguistics (EMNLP-CoNLL), 2012: 1201-1211.
- [7] GERS F A, SCHMIDHUBER J, CUMMINS F. Learning to forget: continual prediction with LSTM[J]. Neural Computation, 2014, 12(10): 2451-2471.
- [8] ZHANG S, ZHENG D, HU X, et al. Bidirectional long short-term memory networks for relation classification[C]// Proceedings of the 29th Pacific Asia conference on language, information and computation. 2015: 73-78.
- [9] Relation classification via recurrent neural network with attention and tensor layers[J]. Big Data Mining and Analytics, 2018, 1(3): 234-244.
- [10] CAI Rui, ZHANG Xiaodong, WANG Houfeng. Bidirectional

recurrent convolutional neural network for relation classification[C]// Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). 2016.

- [11] 龚乐君,刘晓林,高志宏,等. 基于双向 GRU 和 CNN 的药物相互作用关系抽取[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 108-113.
- [12] 宁尚明,滕飞,李天瑞. 基于多通道自注意力机制的电子病历实体关系抽取[J]. 计算机学报, 2020, 43(5): 916-929.
- [13] 郑丽敏,齐珊珊,田立军,等. 面向食品安全事件新闻文本的实体关系抽取研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 244-253.
- [14] 赵赞,吴璠,王中卿,等. 基于注意力机制与文本信息的用户关系抽取[J]. 中文信息学报, 2019, 33(3): 87-93.
- [15] 张心怡,冯仕民,丁恩杰. 面向煤矿的实体识别与关系抽取模型[J]. 计算机应用, 2020, 40(8): 2182-2188.
- [16] 何阳宇,易晓宇,唐亮,等. 基于 BLSTM-ATT 的老挝语军事领域实体关系抽取[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(5): 31-37.