结合雷达目标检测的远距离 3D 注视点估计

张远辉, 段承杰, 朱俊江, 何雨辰

(中国计量大学机电工程学院 杭州 310018)
(zyh@cjlu.edu.cn)

摘要: 基于 2D 映射与双目视线相交方法计算得到的 3D 注视点在角度估计方面已有较高的精度,但在注视距离估计方面还存在较大误差。为此,提出一种借助毫米波雷达检测场景目标的 3D 注视点辅助估计的方法。首先利用一个可移动标定物的移动形成一个虚拟标定平面,用于双眼的 2D 平面注视点标定;然后通过 2D 映射的方式计算出左右眼在标定平面上的 2D 注视点,结合眼球位置可计算出 3D 注视方向;最后在雷达检测的目标点中筛选出与注视方向角度误差最小的点作为候选点,取该点的距离值产生一个虚拟平面,截取左右视线,取 2 个截取点的中点作为 3D 注视点估计结果。设计了融合毫米波雷达、摄像机和可移动标定物的实验装置,在 4.0~10.2 m 的距离范围内进行 3D 注视点测试,实验结果表明,该方法的平均角度误差为 0.9°,平均欧几里得度量误差为 130 mm,结果优于双眼数据几何映射法和深度摄像机辅助估计法。

关键词: 毫米波雷达; 3D 注视点; 辅助估计; 注视点标定; 虚拟平面
中图分类号: TP391.4 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2020.18118

Long Distance 3D Gaze Estimation Combined with Radar Target Detection

Zhang Yuanhui, Duan Chengjie, Zhu Junjiang, and He Yuchen

(College of Electrical and Mechanical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018)

Abstract: The 3D gaze estimation method based on 2D mapping and two lines of sight intersection has high accuracy in angle estimation. However, there are still large errors in the estimation of gaze distance. Thus, a 3D gaze estimation method based on an auxiliary millimeter wave radar target detection is proposed. First, it uses a movable calibration object to form a virtual calibration plane to calibrate the 2D planar fixation point. Next, the 2D fixation points of the right and left eyes on the calibration plane are calculated by the two-dimensional mapping function, and the 3D gaze direction is calculated combining the position of the eyes. Finally, the candidate point which has the smallest error from the gaze angle is selected from the target points detected by radar. A virtual plane is constructed at the distance of this point, by which the left and right lines of sight are intercept, the midpoint of the two intercept points is the estimation result of 3D fixation point. An experimental device is designed to fuse millimeter wave radar, camera and mobile calibration target. The 3D gaze point is tested in the range of 4.0~10.2 m. Experiments shows that with this method, the average angle error is 0.9°, the average Euclidean distance error is 130 mm. The result is better than binocular data geometric mapping method and depth camera aided estimation method.

Key words: millimeter-wave radar; 3D gaze; auxiliary estimation; gaze calibration; virtual plane

收稿日期: 2019-10-14; 修回日期: 2020-10-09. 基金项目: 国家自然科学基金(61801454, 61903352); 浙江省自然科学基金(LY19F010007, LQ18F010006, LQ19F030007). 张远辉(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为计算机视觉、信号处理、机器人智能控制; 段承杰(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉; 朱俊江(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为信号处理; 何雨辰(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为大数据分类诊断方法。

注视点估计是研究人眼视线在计算机等电子设备的屏幕上或 3D 空间中的视线落点, 即人的眼睛在看哪里的一种技术, 包括 2D 和 3D 注视点估计. 2D 注视点估计多用于人机交互^[1]、网页分析等; 3D 注视点估计多用于安全辅助驾驶和 VR 设备交互等. 目前 2D 注视点估计通过映射插值、3D 人眼模型^[2]或深度神经网络^[3]方法已经可以获得较高的估计精度, 2D 注视点只包含注视点落在固定平面上的坐标信息, 未包含物体距离人眼的深度信息. 而基于双目视线相交的方法进行 3D 注视点估计, 在远距离条件下, 由于双目视线趋于平行, 较小的角度误差会导致较大的距离估计误差^[4].

1 相关工作

目前研究者多集中于 3D 注视方向的研究, 即只关注 3D 方向信息, 未关注距离信息. Swirski 等^[5]利用眼球几何结构特征和瞳孔运动模型, 从一组连续的眼睛图像中拟合眼球的立体运动状态, 进而估计出眼球的 3D 朝向. Kim 等^[6]利用 Kinect v2 实现人脸模型估计, 获得人脸注视向量, 并估计眼球的 3D 旋转中心, 二者共同决定了 3D 眼睛注视向量. Lu 等^[7]使用没有红外光照射的眼部图像和模型驱动的虹膜轮廓拟合, 对 3D 注视方向进行估计. Adiba 等^[8]利用神经网络模型对人眼图像中的视觉数据进行训练, 以获得头部姿态和眼睛注视方向信息. Lai 等^[9]结合瞳孔光斑特征和轮廓特征提取眼动信息, 并使用 2 部红外相机捕捉眼部图像, 通过计算 2 个通过眼睛光轴和摄像机平面的交线得到 3D 注视方向. Deng 等^[10]使用 12 台摄像机同步捕获测试者的眼部图像, 通过卷积神经网络计算头部姿态和眼睛注视方向. Lanata 等^[11]使用线性映射、多项式映射和结合映射 3 种方法进行 3D 注视点测试. O'Reilly 等^[12]采用单个摄像机和多个光源, 通过半角估计和斜线距离 2 种方法求解眼球中心坐标, 用于屏幕 3D 视线估计. Liu 等^[13]使用投影仪幕布进行平面注视点标定, 用于远距离的视线跟踪. Adiba 等^[14]使用头戴式设备, 将注视点映射到场景摄像机的画面中, 并对场景中的物体识别分类. Kwon 等^[15]通过左右眼图像及场景摄像机的对极几何原理, 用于驾驶环境中估计驾驶员视线在场景图中的视线落点. Sugano 等^[16]通过大量带有脸部地标点标注的图像进行训练, 并通过随机森林算法对视线方向分类, 以实现 3D 视线方向估计. Yu 等^[17]通过凝视重定向网络以及扭曲场正则化方

法, 用于注视模型训练的数据采集. Liu 等^[18]通过训练差分卷积神经网络, 使用推断的差异来预测一个新眼睛样本的注视方向. Cheng 等^[19]利用非对称回归网络预测双眼的 3D 注视方向.

只能估计 3D 视线的方法应用范围有局限性, 一些学者借助额外的传感器来辅助 3D 注视点具体位置的估计. Wang 等^[20]利用 Kinect 传感器的 3D 点云数据, 作为 3D 注视点估计的辅助信息. Kang 等^[21]使用立体摄像机拍摄前方行车环境, 获取各物体的 3D 坐标, 并选择与估计的 3D 视线的角度最小的场景点作为 3D 注视点, 用于研究驾驶员对交通标识牌的注视估计. Lee 等^[22]使用立体摄像机以及多层感知网络对注视深度进行估计. Takemura 等^[23]使用头戴式眼动设备获取眼动信息, 并利用视觉同步定位与地图绘制(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术来估计头部姿态, 并提取环境信息构建 3D 环境地图, 当人的头部运动时, 可以得到一个 3D 视点. Pieszala 等^[24]使用激光雷达重建环境场景并定位物体区域, 用于虚拟现实场景中的应用.

针对目前 3D 注视点对距离深度估计误差较大的问题, 本文提出一种借助毫米波雷达检测场景物体信息, 用于 3D 注视辅助估计的方法. 目前直接根据眼球的几何模型来估计 3D 视线的方法需要进行用户标定和系统标定, 用户标定需要获取个人的眼睛参数, 如角膜曲率半径、 κ 角等; 系统标定又包括光源和屏幕的标定等^[25], 因此标定过程过于复杂. 本文方法是在 2D 注视点的基础上, 通过连接眼球与虚拟标定平面上的 2D 注视点形成 3D 空间的视线, 进而根据 2 条空间视线的交点得到 3D 空间中的注视点, 标定过程只需进行 2D 注视点标定, 因而本文方法在标定和使用方面更加快捷简单.

2 远距离 3D 注视点估计方法

本文提出的远距离 3D 注视点估计方法, 包括如图 1 所示的注视点标定和使用 2 个阶段. 标定阶段主要是 2D 注视点的标定, 得到 2D 映射函数, 用于计算平面 2D 注视点, 同时通过毫米波雷达的测量确定与虚拟标定平面的相对位置, 用于后续的计算. 使用阶段需要结合眼球位置与平面 2D 注视点位置计算 3D 注视方向, 同时利用毫米波雷达对环境进行检测, 并根据注视方向筛选可能是被注视的目标, 以该目标位置的距离值确定 3D 注视点

的注视距离. 参考 Z 平面截取修正法^[26]的思想, 以该距离值产生一个虚拟平面截取 3D 视线, 计算最终的 3D 注视点. 本文方法在传统的仅以眼部图像作为输入进行注视点估计的基础上, 将毫米波雷达检测的场景物体信息作为辅助输入, 以提高 3D 注视点估计的准确性.

图 1 本文 3D 注视点估计方法

图 2 2D 注视点标定原理

2.2 雷达目标检测

采用毫米波雷达对测试环境中的标定物和测试物体进行检测, 并将雷达坐标系中的目标信息转换到用于 3D 注视点计算的坐标系中. 本实验所用毫米波雷达只能输出水平面上的 2D XY 坐标数据, 为便于后续数据计算, 将其 Y 方向重新定义为 Z 方向, 如图 3 所示.

在 2D 注视点标定阶段, 使用雷达检测可移动标定物体的位置. 可移动标定物的底部设计为角反射器的结构, 可以使之产生较高的反射能量. 由于雷达同时会检测到一些干扰点, 根据各目标物体的反射能量值, 以及标定物的大致活动范围限

2.1 2D 注视点标定

首先基于 2D 映射的方法进行平面注视点标定, 求解出 2D 映射函数, 用于平面注视点的估计. 标定过程通常需要测试者依次注视标定平面上呈九宫格分布的 9 个点, 由于远距离条件下通过传统的放置标定板的方式极不方便, 因此, 提出一种通过可移动标定物沿直线移动形成空间虚拟平面进行标定的方法.

标定原理如图 2 所示, 标定物初始位于 D_1 位置, 标定物上有 3 个等距间隔的标记点, 位于虚拟标定平面上的标定物 $M_1 \sim M_3$, 测试者依次进行注视标定, 同时红外摄像机采集眼部图像. 然后标定物水平移动一定的距离至 D_2 位置, 测试者重复之前的注视标定过程, 直至测试者完成 3 个位置的注视标定, 即 $M_1 \sim M_9$ 的 9 个标定物. 在标定的同时, 通过毫米波雷达检测标定物相对雷达的位置, 进而计算虚拟标定平面的位置及尺寸. 最后通过图像处理算法提取眼部特征点即可计算 2D 映射函数^[26].

图 3 雷达坐标重新定义

定, 限定区域内反射能量最高的目标点为标定物体, 即 $\arg \max_{i \in [1, \dots, N]} f(i) = \{i | Z_1 < z_i < Z_2\}$. 其中, i 为检测到的目标的编号; 函数 $f(i)$ 为目标反射能量; 目标的距离值 z_i 限定在 2 个常数 Z_1 与 Z_2 之间, 代表标定物距离雷达的距离范围. 例如, 标定物在

3 m 处, 则 Z_1 与 Z_2 可以分别取值为 2.5 m 和 3.5 m.

此外, 对 3 次的标定物坐标计算其是否大致处于一条直线上, 进一步确定标定物坐标的有效性. 即计算前 2 个点构成的直线与后 2 个点构成的直线间的斜率的差异

$$\text{abs}\left(\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} - \frac{z_3 - z_2}{x_3 - x_2}\right) < k.$$

其中, $(x_1, z_1), (x_2, z_2), (x_3, z_3)$ 为测得的 3 次标定物的坐标. 所用的雷达只能输出 2D 的坐标(没有高度信息), 因而只需计算 2 段直线的 2D 斜率差异的绝对值是否小于某个常数 k , 根据实际需要可以取 $k = 0.2$.

当雷达与标定物底部的角反射器结构没有处于同一水平高度时, 是以雷达与被测物之间倾斜的平面为参考坐标系输出的坐标, 因而输出的 2D 坐标不能直接用于计算, 需要进行修正转换. 设雷达位置高于标定物 h 距离, 雷达输出的坐标为 (x, z) , 则修正公式为

$$\begin{cases} x' = x \\ z' = \sqrt{z^2 - h^2} \end{cases}.$$

其中, (x', z') 为修正后的坐标. 此处 x 坐标没有发生改变, 无需修正, 距离值 z 始终为正, 无需考虑负值问题.

在 3D 注视点使用阶段, 由于假定被测物是任意放置的, 即各被测物的高度信息位置不是已知量, 则无法对测得的坐标进行修正. 但是注意到, 当物体距离雷达越远时, 高度差引起的雷达测量差异会减小或是消失, 并且本文是以雷达目标信息辅助 3D 注视点估计, 因而只需获得被测物体近似的深度距离坐标值即可.

2.3 3D 注视点估计

本文的 3D 注视点估计原理如图 4 所示, E_l 和 E_r 分别为左右眼球的位置, P_l 和 P_r 分别为通过 2D 映射方法计算的左右眼在虚拟标定平面上的注视点; 连接 $E_l P_l$ 以及连接 $E_r P_r$, 可以得到左右眼的视线方向. 取左右眼球 E_l 和 E_r 的中点 E_m 以及左右平面注视点 P_l 和 P_r 的中点 P_m , 连接 $E_m P_m$ 形成的空间直线作为 3D 注视点的注视方向. 将注视方向投影到水平面上, 即图 4 中经过 E'_m 和 P'_m 的直线, 设由点 E'_m 到点 P'_m 的向量 $\mathbf{v} = (v_x, 0, v_z)$, 则可计算 3D 注视方向的平面角度

$$\alpha = \begin{cases} \arctan(v_z/v_x) + 180^\circ, & \text{if } v_x < 0 \\ \arctan(v_z/v_x), & \text{otherwise} \end{cases}.$$

其中, α 的理论取值为 $0^\circ \sim 180^\circ$; 以此角度向两侧扩展一定的角度 θ , 作为注视点目标候选区域, 即深色三角形区域. 在雷达目标中以类似的方法计算各目标点的角度, 并选取目标角度处于此范围的目标点, 图 4 中的圆柱形物体表示雷达检测到的目标位置. 若存在多个候选目标, 则选择角度最接近的目标作为最优候选目标. 以最优候选目标的距离值作为 3D 注视点的距离值, 根据 Z 平面截取修正法, 产生一个平行于虚拟标定平面的虚拟截取平面, 截取左右视线, 得到左右 2 个截取点 G_l 和 G_r , 取它们的中点 G_m 作为最终的 3D 注视点位置估计.

图 4 远距离 3D 注视点估计原理

实验中所有计算均是基于 O_1 坐标系, 坐标系的建立过程如图 5 所示, 其中 O_1 和 O_2 坐标系对应于图 4 中的坐标系. 虚拟标定平面的坐标系为 $O_1-X_1Y_1Z_1$, 其原点位于虚拟标定平面的左上角, 实验中注视点误差等的计算都是基于该坐标系. 毫米波雷达的坐标系为 $O_2-X_2Y_2Z_2$, 其坐标轴方向分别与 O_1 坐标系的方向一致, 其原点的具体位置无固定要求, 但需要测量与眼睛的相对位置(用于后续计算眼睛在 O_1 坐标系的坐标), 实验中根据雷达摆放的方便性将毫米波雷达放在了眼睛前下方处.

图 5 坐标系的建立过程

对于坐标系的转换,在雷达坐标系下的数据需要通过一个平移矩阵 T 转换到虚拟标定平面的坐标系,即

$$(X_1^p \ Y_1^p \ Z_1^p)^T = (X_2^p \ Y_2^p \ Z_2^p)^T + T_{3 \times 1}.$$

其中, $(X_1^p \ Y_1^p \ Z_1^p)^T$ 和 $(X_2^p \ Y_2^p \ Z_2^p)^T$ 分别表示任意点 p 在虚拟标定平面坐标系和雷达坐标系中的坐标;矩阵 T 由 2 个坐标系原点间的位置关系决定. 本实验中矩阵为

$$T = (\Delta x \ 0 \ \Delta z)^T \quad (1)$$

a. 前视图

b. 后视图

图 6 实验装置与测试场景

头部支架用于保持测试者头部相对静止;图像采集设备为 USB 接口的红外摄像机,并配用红外补光灯;雷达检测设备采用 TI 公司的毫米波雷达;可移动标定机构为图 6b 所示 4 轮小车. 其底部主体设计为角反射器结构,以增加反射强度;上部的标定杆上有 3 个标记点,间距为 50 cm,通过 STM32 微控制器控制标定物移动,并连接有 3DR 数传模块,可通过电脑上位机进行无线通信,控制小车移动;小车轮子上装有光电编码器,用于测量移动的距离. 测试物体选用一个雷达角反射器,用于提高雷达检测效果,角反射器被固定在一个 1.1 m 的杆子上.

实验数据的采集通过上位机程序完成,上位机程序采用 wxWidgets 库编程,设计的操作界面如图 7 所示. 其实现的功能包括 3 部分: (1) 雷达目标数据的采集与解析. 通过串口接收毫米波雷达的数据,并将解析的目标结果以位置分布和反射能量曲线的形式显示出来,同时将目标点坐标数据输出保存为文本文件. (2) 测试者眼部图像的采集. 将图像序列实时显示并以视频文件的形式保存.

其中,矩阵 T 的具体数值来源于 2D 注视点标定阶段雷达测得的可移动标定物的位置数据,毫米波雷达无 Y 方向数据,用 0 表示无需转换.

3 实验与结果分析

3.1 实验设置

实验装置与测试场景如图 6 所示,实验装置可分为头部支架、图像采集设备、雷达检测设备和可移动标定机构等.

(3) 在标定测试阶段. 控制可移动标定物的移动以及通过语音提示音,提示测试者依次注视不同的目标点.

实验流程如图 8 所示.

Step1. 布置实验场景. 实验假定头部支架的位置是已知的,雷达与头部支架的相对位置是固定的. 在测试场景前部放置角反射器作为注视测试点,实验过程中依次移动到预先设定的位置,并测量其真实位置用于最后的误差分析. 可移动标定物放于场景前方 3 m 且偏左侧约 60 cm 处.

Step2. 数据同步采集. 通过上位机程序操作,实验开始时会有实验开始的语音提示;之后根据短“嘀”的提示音,测试者从上至下注视标定杆上的 3 个标定点,2 次提示音之间间隔约 3 s,每个标定点处会采集 10 帧图像,并以视频形式保存,同时雷达检测场景中的目标点,并以文本文件保存. 同一处标定杆上的 3 个标定点完成后,上位机控制标定物向右移动 60 cm,继续标定. 当完成 3 个位置,即 9 个标定点的标定后,平面注视点标定阶段结束,上位机发送指令控制标定物移动到场景一旁,进入测试阶段. 测试阶段依然是根据系统语音提示,分别注视场景中放置的角反射器以及支撑角反射的竖杆底部位置,之后由他人将角反射器移动至下一处位置

图 7 实验操作界面

继续测试, 一共测试 9 个位置, 即一共测试 18 个点. 9 个测试位置呈九宫格分布, 横向间距约 1.2 m, 纵向间距约 3.1 m, 测试物距测试者的距离在 4.0~10.2 m, 其示意分布如图 9 所示; 9 个红点是虚拟平面上的标定点的位置, 18 个蓝点是测试点的位置, 这 18 个特定位置点即为测试阶段 3D 注视点的真实值, 其通过尺子进行手工测量的方式确定其位置.

Step3. 对实验数据进行分析. 首先是数据预处理, 对雷达数据单位转换, 由米转换为毫米, 并将坐标转换到以虚拟标定平面左上角为原点的坐标系中. 通过图像算法提取视频帧中的眼部图像的特征点, 包括瞳孔中心点以及反射光斑点, 视频中每 10 帧为一组. 测试中存在短暂闭眼情况, 通过算法识别出存在闭眼的无效帧并剔除, 依次选取 5 帧有效数据进行记录保存. 然后计算注视点结果, 先计算 2D 映射函数后, 可以计算出测试阶段的左右眼平面注视点, 进而可以得到 3D 注视点的方向; 再对雷达目标点进行筛选, 选取处于注视角度范围内且最接近注视角度的目标点作为注视候选点, 以该目标点产生一个虚拟平面, 截取左右视线, 取 2 个截取点的中点作为最终的 3D 注视点.

Step4. 对 3D 注视点的误差进行分析. 计算估计值与真实目标值的误差, 包括 3 个方向的距离误差、欧几里得度量误差和角度误差.

3.2 双眼及单独左右眼条件的对比实验

使用不同眼数据估计 3D 注视点实验结果的可视化显示如图 10 所示, 左侧红蓝 2 个圆点为人的左右眼球, 中部的竖直半透明平面为虚拟标定平面, 标定平面上的红蓝米字型符号为计算的左右平面注视点, 连接眼球与平面注视点的直线即为 3D 视线, 18 个红色点是最终估计的 3D 注视点的位置,

8 个绿色点是对应的真实目标的位置, 估计点与真实点之间通过短黑线连接代表空间位置误差.

图 8 实验流程

图 9 测试物分布示意图

在远距离条件下,由于左右视线趋于平行,差异性消失,因此可考虑使用单只眼的信息计算单条视线方向替代左右眼视线的平均值,从而简化计算过程.某位测试者使用双眼数据与使用单只眼数据计算得到的3D注视点的实验误差对比结果

图 10 实验结果可视化展示

图 11 使用不同眼数据的对比结果

使用双眼数据可以得到误差较小且稳定的结果,将测试者使用双眼数据计算的多次测试结果汇总求平均值,最终的3D注视点误差如表1所示.

从表1可以看出,整个场景中18个测试点的平均欧几里得度量误差约为130 mm,平均角度误差0.9°.

如图11所示,包括欧几里得度量误差、角度误差以及欧几里得度量误差在3个分量方向上的误差.每个子图包含18个测试点,其顺序是按照由近到远,由左到右,由上到下的方式排列.

从图11可以看出,对于该测试者,与使用双眼数据进行注视点估计相比,单独使用左眼数据,距离误差和角度误差会增大;而单独使用右眼数据,距离误差和角度误差会略有减小.该差异与测试者的左右眼视力有关,因为该测试者的左眼近视度比右眼高200°,其左眼图像的定位精度受眼镜玻璃畸变影响较大.因而,在不需要较高精度的情况下,可以只使用单眼数据进行3D注视点估计,以减少数据处理量.

3.3 与同类研究的对比结果

由于目前3D注视点的方法仍处于一个探索阶段,研究者均以独特的方式进行探索,尚无法统一限定3D注视点估计的输入,但各方法的输出均为注视点在空间中的3D坐标.使用本文的借助毫米波雷达目标检测辅助3D注视点估计的方法(测试

距离 4.0~10.2 m), 对比使用的双眼数据几何映射的方法^[11](测试距离 3.5~5.0 m)以及深度摄像机辅助 3D 注视点估计的方法^[21](测试距离 4.0~8.0 m), 3D 注视点误差对比数据如表 2 所示。

表 1 使用双眼数据实验平均误差对比

测试 次数	X 方向/ mm	Y 方向/ mm	Z 方向/ mm	欧几里得 度量/mm	角度/ (°)
1	41	166	99	205	2.16
2	65	72	99	149	1.61
3	19	48	54	78	0.71
4	22	37	54	72	0.63
5	34	47	2	69	0.88
6	45	92	2	105	1.24
7	42	53	64	101	0.51
8	33	49	64	92	0.51
9	83	40	53	113	0.73
10	52	41	53	94	0.59
11	59	61	6	92	0.70
12	64	69	6	102	0.75
13	129	79	101	187	0.79
14	97	68	101	168	0.67
15	132	85	53	187	0.97
16	95	74	53	147	0.72
17	99	156	48	204	1.06
18	126	98	48	180	0.92
平均值	69	74	53	130	0.90

表 2 不同方法实验误差对比

方法	误差			
	欧几里得 度量/mm	角度/(°)	深度绝对/ mm	深度误差 百分率
本文	130	0.90	53.0	0.52
Lanata 等 ^[11]		0.90	147.6	3.47
Kang 等 ^[21]	126	0.98		

从对比结果可以看出, 与其他方法相比, 本文方法在距离范围更大的测试情况下, 欧几里得度量误差和角度误差依然可以得到相当的精度, 并且深度绝对误差相比 Lanata 等^[11]的实验结果有明显减小, 从 147.6 mm 减小到了 53.0 mm。

3.4 误差分析及展望

本文方法的定位精度主要受到几个因素的影响: (1) 标定误差。本文基于毫米波雷达的天线阵面和虚拟标定平面相互平行的假设, 若两者之间存在角度误差, 则影响两者坐标系之间的转换关系。引入测量误差, 误差角越大, 则误差越大, 误差大小可由式(1)中引入旋转矩阵加以计算估计。

(2) 人脸部有轻微变动的影响。本文方法在实验中要求保持人脸姿势不动, 因为 3D 注视视线是连接人眼位置和空间虚拟标定平面上注视点的直线, 当脸部轻微变动后, 人眼位置发生移动, 而空间虚拟标定平面上的注视点保持不变, 因而导致视线方向计算发生偏转。以虚拟标定平面距离人眼 2 m 为例, 若实际目标距离人眼 4 m, 则人眼向左侧移动 1 cm 后带来的误差为 3D 截取平面上向右偏移 1 cm。后期研究需要通过对面部的 3D 实时跟踪加以补偿。(3) 本文方法使用的雷达为 TI 公司的 AWR1642, 其天线阵列水平排布, 因此水平方向的目标定位和分辨率较高, 俯仰方向的探测波束宽度仅为 $\pm 15^\circ$ 。本文实验中, 当测量最大距离为 10 m 左右时, 物体高度信息可忽略不计; 当注视更远距离目标且目标较高时, 雷达探测识别较为困难, 雷达测量距离信息需修正为水平距离; 同时由于虚拟标定平面为竖直平面, 而当目标为较远较高目标时, 其等效截取面为一球面, 是否适用于传统 2D 到 2D 的映射方法需要进一步探索研究。

4 结 语

针对远距离 3D 注视点估计的距离值不易估计的问题, 本文提出的通过借助雷达检测目标进行注视点辅助估计的方法, 可以有效地实现远距离下较高精度的 3D 注视点估计。本文方法为远距离 3D 注视点估计的实践以及在安全辅助驾驶方面的应用提供了一种思路。

本文方法对于 3D 注视点深度方向的估计依赖于雷达的检测信息, 因而对雷达目标检测的精度要求较高, 并且只适用于目标点较分散的情况。今后会考虑使用更高精度的雷达或其他传感器来检测场景中的物体位置。

参考文献(References):

- [1] Cheng Shiwei, Wei Qianjing, Zhang Zhangwei, *et al.* Gaze perception and computation method in the environment of mobile device interaction[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(1): 1-9(in Chinese)
(程时伟, 魏千景, 张章伟, 等. 移动设备交互环境下的注视点感知计算方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(1): 1-9)
- [2] Zhou Xiaolong, Tang Fanyang, Guan Qiu, *et al.* A survey of 3D eye model based gaze tracking[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(9): 1579-1589(in Chinese)

- (周小龙, 汤帆扬, 管秋, 等. 基于 3D 人眼模型的视线跟踪技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(9): 1579-1589)
- [3] Xiong Y Y, Kim H J, Singh V. Mixed effects neural networks (MeNets) with applications to gaze estimation[C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 7743-7752
- [4] Gutierrez Mlot E D, Bahmani H, Wahl S, *et al.* 3D gaze estimation using eye vergence[C] //Proceedings of the 9th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies. Setúbal: SciTe Press, 2016: 125-131
- [5] Swirski L, Dodgson N. A fully-automatic, temporal approach to single camera, glint-free 3D eye model fitting[C] //Proceedings of the 3rd International Workshop on Pervasive Eye Tracking and Mobile Eye-Based Interaction. New York: ACM Press, 2013: 1-10
- [6] Kim B C, Ko D, Jang U, *et al.* 3D gaze tracking by combining eye-and facial-gaze vectors[J]. The Journal of Supercomputing, 2017, 73(7): 3038-3052
- [7] Lu F, Gao Y, Chen X W. Estimating 3D gaze directions using unlabeled eye images via synthetic iris appearance fitting[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(9): 1772-1782
- [8] Adiba A I, Asatani S, Tagawa S, *et al.* Gaze tracking in 3D space with a convolution neural network “see what I see”[C] //Proceedings of the IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 1-7
- [9] Lai C C, Shih S W, Hung Y P. Hybrid method for 3D gaze tracking using glint and contour features[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 25(1): 24-37
- [10] Deng H P, Zhu W J. Monocular free-head 3D gaze tracking with deep learning and geometry constraints[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 3143-3152
- [11] Lanata A, Greco A, Valenza G, *et al.* On the tridimensional estimation of the gaze point by a stereoscopic wearable eye tracker[C] //Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 2283-2286
- [12] O'Reilly J, Khan A S, Li Z Y, *et al.* A novel remote eye gaze tracking system using line illumination sources[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 449-454
- [13] Liu C C, Herrup K, Shi B E. Remote gaze tracking system for 3D environments[C] //Proceedings of the 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 1768-1771
- [14] Adiba A I, Tanaka N, Miyake J. An adjustable gaze tracking system and its application for automatic discrimination of interest objects[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 973-979
- [15] Kwon S H, Kim M Y. Selective attentional point-tracking through a head-mounted stereo gaze tracker based on trinocular epipolar geometry[C] //Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 1617-1621
- [16] Sugano Y, Matsushita Y, Sato Y. Learning-by-synthesis for appearance-based 3D gaze estimation[C] //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 1821-1828
- [17] Yu Y, Odobez J-M. Unsupervised representation learning for gaze estimation[C] //Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 7314-7324
- [18] Liu G, Yu Y, Funes Mora K A, *et al.* A differential approach for gaze estimation[OL]. [2019-10-14]. <https://arxiv.org/abs/1904.09459?context=cs.CV>
- [19] Cheng Y H, Lu F, Zhang X C. Appearance-based gaze estimation via evaluation-guided asymmetric regression[C] //Proceedings of European Conference on Computer Vision. Heidelberg: Springer, 2018: 105-121
- [20] Wang H F, Antonelli M, Shi B E. Using point cloud data to improve three dimensional gaze estimation[C] //Proceedings of the 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 795-798
- [21] Kang M C, Yoo C H, Uhm K H, *et al.* A robust extrinsic calibration method for non-contact gaze tracking in the 3-D space[J]. IEEE Access, 2018, 6: 48840-48849
- [22] Lee Y, Shin C, Plopski A, *et al.* Estimating gaze depth using multi-layer perceptron[C] //Proceedings of the International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2017: 26-29
- [23] Takemura K, Takahashi K, Takamatsu J, *et al.* Estimating 3-D point-of-regard in a real environment using a head-mounted eye-tracking system[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2014, 44(4): 531-536
- [24] Pieszala J, Diaz G, Pelz J, *et al.* 3D gaze point localization and visualization using LiDAR-based 3D reconstructions[C] //Proceedings of the 9th Biennial ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications. New York: ACM Press, 2016: 201-204
- [25] Liu Jiahui, Chi Jiannan, Yin Yixin. A review of feature-based gaze tracking methods[J/OL]. Acta Automatica Sinica: 1-26[2019-10-14]. [https://doi.org/10.16383/j.aas.c180844\(in Chinese\)](https://doi.org/10.16383/j.aas.c180844(in Chinese))
(刘佳惠, 迟健男, 尹怡欣. 基于特征的视线跟踪方法研究综述[J/OL]. 自动化学报: 1-26[2019-10-14]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c180844>)
- [26] Zhang Yuanhui, Duan Chengjie, Zhu Junjiang, *et al.* 3D gaze estimation using eyeball optical center calibration and distance correction[J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(8): 1369-1380(in Chinese)
(张远辉, 段承杰, 朱俊江, 等. 眼球光心标定与距离修正的 3 维注视点估计[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(8): 1369-1380)