

基于 Mediapipe 的幻影成像装置自然手势交互系统设计*

孟杰 杨鹏程 杨朝 李小成
(西安工程大学机电工程学院 西安 710048)

摘要:针对博物馆中幻影成像虚拟展示装置的交互需求,设计了一种自然手势的计算机视觉交互系统。利用单目相机对自然手势进行动作采集,针对不同身高人群手部活动范围,计算了单目相机最优捕获位置,实现了140~190 cm人群高度的手势识别。采用 Mediapipe 机器学习框架对捕获的手势图像实时遍历,获得单帧手掌的标定位置。结合21个特征关节点的手掌模型,使用非极大值抑制算法对自遮挡的手掌进行识别,根据欧氏空间距离判别阈值和单个手指曲率对指间动作做出分类,定义幻影成像常用5种交互动作,通过坐标关系建立了指尖和模型特征点之间的实时映射。实验结果表明,所设计的交互系统,系统识别准确率达到98%,满足幻影成像系统中手势控制虚拟模型的要求。

关键词:幻影成像;人机交互;手势识别;Mediapipe;非极大值抑制算法

中图分类号: TP37;TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.20

Design of natural gesture interaction system for phantom imaging device based on Mediapipe

Meng Jie Yang Pengcheng Yang Zhao Li Xiaocheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the interactive requirements of the virtual display device of phantom imaging in museums, a computer vision interactive system with natural gestures is designed. The monocular camera is used to collect the action of natural gestures. The optimal capture position of the monocular camera is calculated according to the range of hand activities of people with different heights, and the gesture recognition of 140~190 cm crowd height is realized. The Mediapipe machine learning framework is used to traverse the captured gesture image in real time to obtain the calibration position of a single hand frame. Combined with the palm model of 21 feature points, the non-maximum suppression algorithm is used to identify the self-occluded palm. According to the Euclidean space distance discrimination threshold and the curvature of a single finger, the inter-finger actions are classified. Five common interactive actions in phantom imaging are defined, and the real-time mapping between the fingertip and the model feature points is established through the coordinate relationship. The experimental results show that the recognition accuracy of the interactive system designed in this paper reaches 98%, which meets the requirements of gesture control virtual model in phantom imaging system.

Keywords: phantom imaging; human-computer interaction; gesture recognition; Mediapipe; non-maximum suppression

0 引言

幻影成像是基于“实物模型”和“立体幻影”结合的光学成像,利用光学错觉原理及人眼视觉心理特征,获得“立

体幻影”与实物模型相结合及相互作用的逼真视觉效果^[1],具备强烈的纵深感、立体感,故常适用于博物馆、展览馆、美术馆等科普性场所。加入人机交互的幻影成像系统,现场参观者还可通过各种手势交互动作,操作光影模

收稿日期:2022-10-06

* 基金项目:陕西省自然科学基金面上项目(2022JM-219)资助

型的旋转、放缩,视觉效果甚佳。

目前,基于手势的交互系统主要通过如下几种方式实现:肌电信号^[2]、传感器、数据手套以及计算机视觉^[3]。传感器手势识别技术是通过手持传感、红外传感^[4]等设备获取手部位置、角度和速度等信息^[6],根据不同信号设置指令完成交互任务,这种交互方式具有抵抗外界干扰能力强的优点,但由于传感器的感应范围有限,在进行手势识别时存在范围小、鲁棒性弱等问题^[6]。于昌立等^[7]通过数据手套实现了对无人机端侧的控制,数据手套本质上也是由传感器来完成手势的信号收集,该方式识别率高,但设备昂贵,且数据手套本身不提供与空间位置相关的信息,必须与位置跟踪设备连用,一定程度上限制使用者活动范围^[8]。基于计算机视觉的手势识别是一种新的交互方式,通过相机对不同手势进行实时跟踪采集,将手势信息传输到计算机,利用图像处理、机器学习^[9]等方法对手势图像进行处理,定义手势类别,实现不同手势控制的人机交互。

基于计算机视觉的手势识别为人机交互提供了更为自然理想的交互方式,随着计算机视觉技术的提高与图像处理技术的发展,越来越多的研究者已经着手于基于计算机视觉的手势交互研究。Kofman 等^[10]将手势识别与机器人控制进行结合,利用摄像头捕获手势图像,通过手部动作控制机器人运动状态。Zhou 等^[11]基于计算机视觉,利用主成分分析(principal component analysis, PCA)等算法开发了用于手势交互的虚拟鼠标,通过识别手指状态控制相应按键的点击发生。基于计算机视觉的静态手势及动态手势交互^[12]已经不断被应用于各种交互环境,但应用于幻影成像控制的计算机视觉手势交互系统还研究较少。

因此,本文针对幻影成像装置的人机交互需求,设计了一种自然手势的计算机视觉交互系统。通过分析摄像机位置摆放,建立相机捕获区域与人体动作之间的数学模型,获得了不同人体手势的最优捕获位置。采用计算机视觉的方法,利用 Mediapipe 机器学习框架判断手势动作并进行动作语义定义,从而实现手势动作对幻影成像模型的多维控制效果,并可根据不同模型建立不同的手势交互动作。

1 交互系统的搭建

1.1 系统总体流程

幻影成像交互系统方案设计如图 1 所示。系统由手势动作识别和幻影成像两部分组建而成。交互动作通过手势识别部分进行手掌检测及手势定义,并输出控制指令至幻影成像部分,由投影仪将文物藏品的三维影像投影至幻影成像设备上,实现虚拟三维模型的投影成像及交互控制。

1.2 幻影成像装置设计

基于计算机视觉的手势识别根据图像采集的不同方

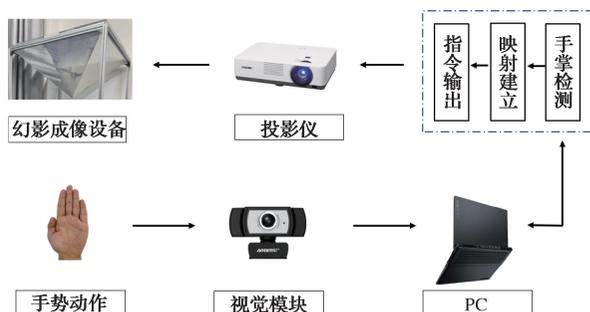


图 1 幻影成像交互系统设计方案

式可选用深度相机、立体相机、单目相机 3 类。相比于深度相机和立体相机,单目相机不用借助外部设备^[13],通过采集红绿蓝(red green blue, RGB)^[14]彩色图像,比较多帧差异可以得到深度信息,且数据量小、识别率高,常用在各种电子产品中,适用于博物馆等展览场所的电子设备当中。

幻影成像交互系统所需的硬件设备如表 1 所示。

表 1 幻影成像交互系统设备信息

设备名称	规格参数
单目相机	Aoni C33(229-7CH)
PC	LEGION Y7000
CPU	Intel(R)_Core(TM)_i7_9750H
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650
投影仪	SONY VPL-DX220
全息金字塔	100 cm×100 cm×4

本文投影式光源装置采用投影仪投影,光线以投影仪为光源中心向外发射,入射至空气与介质的分界面时光线发生折射、反射现象被人眼所接受^[15]。幻影成像装置的示意图和实测图如图 2 所示。

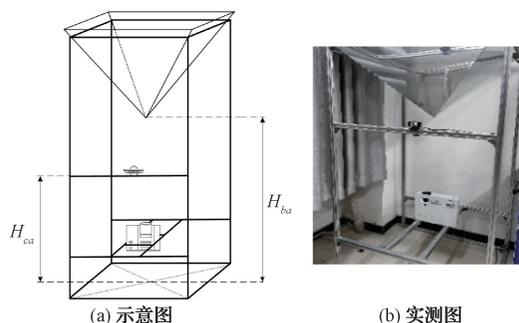


图 2 幻影成像装置

在实际的交互场景中,无法对现场参观者的身高距离做出标准规定,人机交互的不同高度、不同距离,导致手势信息采集的不完整,都会影响手势识别的准确率。

摄像机捕获区域示意图如图 3 所示。为满足不同人群的交互体验,对不同身高交互者的手部活动范围和摄像

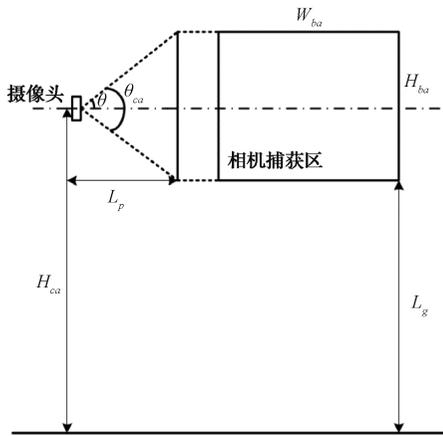


图3 摄像机捕获区域示意图

机捕获区域建立数学模型,计算得到单目相机的最优捕获识别位置。因此,对单目相机在成像装置中的位置做出合理规定。

以规定单目相机高度 $H_{ca} = 90 \text{ cm}$, 距离目标物 $L_p = 150 \text{ cm}$ 的实验环境下,在测得在现实环境中的相机捕获区,记为 P_{ba} , 约为 $120 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$, 其长度记为 W_{ba} , 高度记为 H_{ba} 。

$$P_{ba} = W_{ba} \times H_{ba} \quad (1)$$

对单目相机在使用过程中的捕获角度做出计算,公式如下:

$$\theta_{ca} = 2\theta = 2 \cdot \arctan\theta \cdot \frac{H_{ba}}{W_{ba}} \quad (2)$$

得到其使用过程中单目相机的捕获角度约为 30° 。使用幻影成像装置时,当人体与单目相机之间的距离 $L_p = 80 \text{ cm}$, 符合使用习惯,有较好的人机交互体验。结合计算的到单目相机的捕获角度 θ_{ca} 和人机距离 L_p , 得到此时的背景捕获区的高度 $H_{ba} = 42 \text{ cm}$ 。公式如下:

$$H_{ba} = 2 \cdot \tan\theta \cdot L_p \quad (3)$$

考虑到幻影成像交互系统的应用场所和使用者画像,以最低人体身高 $H_{pmin} = 140 \text{ cm}$ 和最高人体身高 $H_{pmax} = 190 \text{ cm}$ 为身高界限,结合人际关系和人体构造学,规定手势动作基本完成在自然人的胸腹之间,以黄金比例 $f_p = 0.618$ 为比例因子,计算得到捕获背景画面的最低水平线到地面之间的最低高度和最高高度约为 $95 \sim 129 \text{ cm}$, 记为 L_{gmin} 和 L_{gmax} 。

$$L_{gmin} = H_{pmin} \cdot f_p \quad (4)$$

$$L_{gmax} = H_{pmax} \cdot f_p \quad (5)$$

由此最终得到相机的固定范围约为 $116 \sim 120 \text{ cm}$ 。

$$H_{ca} = L_g + \frac{1}{2} \cdot H_{ba} \quad (6)$$

2 动作识别系统设计

基于计算机视觉对手势识别系统进行设计。首先利用单目相机获取手势图像,其次使用 Mediapipe 机器学习

框架进行手掌动作检测并建立屏幕之间的交互映射关系^[16];最后,针对在博物馆中幻影成像系统进行文物藏品展示的实际交互需求,进行手势动作定义及控制指令输出。

2.1 Mediapipe 手掌检测

手掌检测是一项复杂的任务。在图像捕获区具有较大的比例跨度内,模型必须适用于各种手部尺寸,并且能够检测被遮挡和自遮挡的手部特征。而手部图案缺乏高对比度,使得仅从视觉特征上检测相对困难。

本文使用 Mediapipe 对手掌进行检测,Mediapipe 是一个基于图像处理的多机器学习框架^[17],其中 Mediapipe Hands^[18]用于对相机捕获的手部动作进行深度检测。

1)由于手掌是相对较小的物体,因此非最大抑制算法即使在手部被遮挡的情况下也能很好的工作;2)使用方向边界框即锚点对手掌进行建模,可以忽略捕获区域的整体纵横比,根据上一帧中识别的手部特征生成裁剪,只有在无法识别时才重新调用模型进行检测,从而减少了锚点的数量。

首先,手掌检测模型对相机捕获的完整图像进行扫描处理,并实时返回手掌定位边界框。其次,在手掌检测模型的定位区域内运行手部地标模型,从而返回图4所示具有高保真特点的3D手掌关节节点模型。

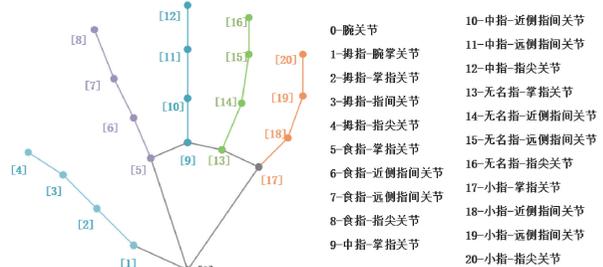


图4 Mediapipe 手掌关节节点坐标图

手掌检测模型检测过捕获后的整个图像,随后手部地标模型与图像结合,在被检测到手部区域精确定位出21个3D指关节坐标^[19]如图5所示。(即 x, y, z 轴),其

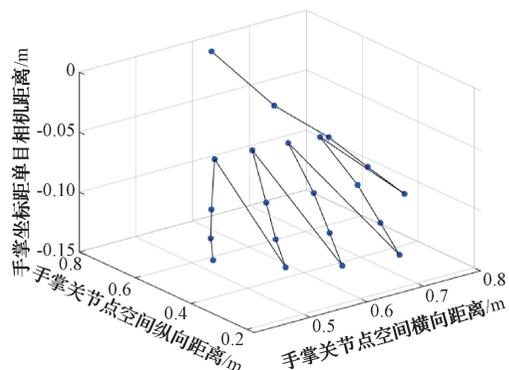


图5 3D指关节坐标图

中, x 、 y 、 z 值分别表示以手腕关节点“0”为原点的空间三维坐标上的值, z 值为捕捉目标到单目相机的深度, z 值越小即表示目标离单目相机越近。由于手掌是较小的对象, 因此使用非极大值抑制算法即使对于握手等双手自遮挡情况也能很好地工作。

使用单目相机采集到手势图像后运行 Mediapipe 并返回关键点坐标。在得到手部关键点的坐标后, 通过计算欧氏距离, 对检测到的手部关键点之间的距离和单个手指的关节曲率进行计算, 而后根据自定义的判断条件规定手势动作和动作语义, 即可实现系统的手势识别。食指关节索引点坐标关系如图 6 所示。

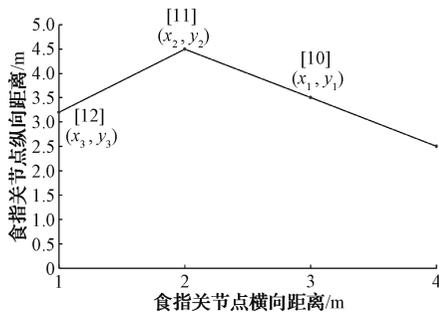


图 6 食指关节索引点坐标关系

比如计算图 6 中指向向量 $\overrightarrow{10-11}$ 和 $\overrightarrow{11-12}$ 之间的指关节夹角 θ_f , 当 θ_f 的角度值大于某一角度阈值时认为此时该关节处于“伸直”, 小于某一角度阈值时定义处于关节“折弯”。以运动过程中中指关节节点 10-11-12 为例, 由于已知 3 个点的坐标 (x, y) , 使用空间距离公式和反三角函数求得关节点之间的距离 L_f 和角度 θ_f 。

$$L_f = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7)$$

$$\theta_f = \arctan \frac{x_1 - x_2}{y_2 - y_1} + \arctan \frac{x_2 - x_3}{y_2 - y_1} \quad (8)$$

2.2 屏幕交互映射建立

对手势坐标进行捕获时, 主要以五指的手指关节为主, 但因手部整体的完整性和不规则性, 故对整体手掌的移动区域做出规定。利用框图建立手掌移动区域, 保证手势运动过程中手掌被捕捉的完整性。在建立屏幕交互映射关系(图 7)时, 按照嵌入关系将屏幕显示区域划分为 4 部分, 分别是手掌框选区 P_{ha} 、手势动作区 P_{mo} 、相机捕获区 P_{ca} 、屏幕显示区 P_{sc} 。

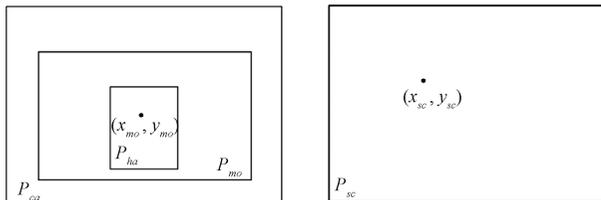


图 7 屏幕区域交互映射关系

其中, 手势动作区域 P_{mo} 与屏幕显示区域 P_{sc} 之间存在

在比例关系:

$$f_p = \frac{P_{sc}}{P_{mo}} \quad (9)$$

建立手掌坐标与屏幕显示区域的坐标映射关系。分别以屏幕显示区左下角和手势动作区左下角为坐标原点 $(0, 0)$, 以食指一指指尖关节坐标为手掌模型的移动牵引点, 其坐标相对于手势动作区 P_{mo} 表示为 (x_{mo}, y_{mo}) , 相对于屏幕显示区域 P_{sc} 表示为 (x_{sc}, y_{sc}) , 屏幕显示区域的长度和宽度记为 W_{sc} 和 H_{sc} 。手势运动时, 坐标位置在手动动作区 P_{mo} 和屏幕显示区 P_{sc} 之间的映射关系为:

$$x_{sc} = x_{mo} \cdot \frac{P_{sc}}{P_{mo}} = x_{mo} \cdot f_p, \quad 0 \leq x_{sc} \leq w_{sc} \quad (10)$$

$$y_{sc} = y_{mo} \cdot \frac{P_{sc}}{P_{mo}} = y_{mo} \cdot f_p, \quad 0 \leq y_{sc} \leq H_{sc} \quad (11)$$

2.3 交互指令建立

在幻影成像系统实际使用时, 根据实际需求, 常用于进行控制的动作一般有对文物虚拟数字模型的旋转、放大和缩小, 故在此基础上设计本文系统模型的交互指令。

对手掌不同关节点之间的距离和角度做出判断后, 需要定义手指状态以便进一步定义手势语义, 将不同的手指状态记为 A_0 。根据研究需要, 对手指指尖做出“向上”和“向下”的定义, “向上”记为 U_f , “向下”记为 D_f 。以五指的拇指一指间关节、食指一指间关节、中指一指间关节、无名指一指间关节、小指一指间关节 5 个索引位置为依据点, “向上”定义为“1”, “弯曲”定义为“0”。

$$A_0 = U_f + D_f \quad (12)$$

$$A_0 = \{x \mid x = 0, 1\} \quad (13)$$

1) 手掌移动 A_1

此动作指令等效于移动指针。以食指一指指尖关节为手掌模型的移动牵引点, 当只有食指竖起其余手指弯曲时, 即开始执行手掌移动 A_1 动作。当该动作首次出现时, 记为 S_{A_1} , 此后在手动动作区域内对食指一指指尖关节进行目标追踪, 移动结束动作记为 F_{A_1} 。手掌模型在手动动作区 P_{mo} 内发生移动, 并通过映射关系指针在屏幕显示区 P_{sc} 上发生移动。

$$A_1 = \{0, 1, 0, 0, 0\} \quad (14)$$

$$A_1 = S_{A_1} + F_{A_1} \quad (15)$$

移动动作 A_1 的效果如图 8 所示, 图 8(a) 表示指尖移动前区域, 图 8(b) 表示指尖移动后区域。



(a) 指尖移动前区域 (b) 指间移动后区域

图 8 手掌移动 A_1 演示效果

2) 单击确认 A_2

此动作等效于鼠标左键单击。单击动作以拇指一指关节和食指一指关节为判断点,当只有拇指指尖和食指指尖向其余手指弯曲时,定义此时进入预单击状态,记为 P_{A_2} 。完成预单击动作后,判断两个指尖索引点的距离 H_{A_1} ,若指尖距离 $H_{A_1} < 0.3 \text{ mm}$,则定义完成单击动作 C_{A_2} ,确定当前手掌模型位置。

$$A_2 = \{1, 1, 0, 0, 0\} \quad (16)$$

$$A_2 = P_{A_2} + C_{A_2}, H_{A_1} < 0.3 \text{ mm} \quad (17)$$

单击确认如图 9 所示,图 9(a)表示预单击状态,图 9(b)表示完成单击动作。

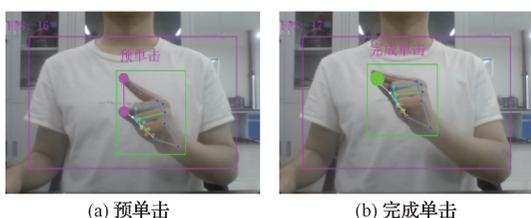


图 9 单击确认 A_2 演示效果

3) 模型拖拽 A_3

此动作控制数字模型的空间旋转。当手掌的五指指尖都“向下”,此时手掌进入握拳状态即五指全部处于 D_f 时,定义进入预拖拽状态,记为 P_{A_3} 。完成预拖拽动作后,保持 P_{A_3} 状态,时长 $T_{A_3} \geq 0.5 \text{ s}$,在手势动作区 P_{mo} 内进行自由拖拽,记为 D_{A_3} 。若手势移动范围 A_3 即将超出或超出手势动作区 P_{mo} 时,可利用手掌移动动作 A_1 将手掌模型移动回 P_{mo} 区域内,此动作可根据实际需要反复完成,实现对数字模型的自由拖拽。

$$A_3 = \{0, 0, 0, 0, 0\} \quad (18)$$

$$A_3 = P_{A_3} + D_{A_3}, T_{A_3} \geq 0.5 \text{ s}, P_{A_3} < P_{mo} \quad (19)$$

$$A_3 = P_{A_3} + D_{A_3} + A_1, T_{A_3} \geq 0.5 \text{ s}, P_{A_3} \geq P_{mo} \quad (20)$$

模型拖拽 A_3 的效果如图 10 所示,图 10(a)表示预拖拽状态,图 10(b)表示模型拖拽动作。

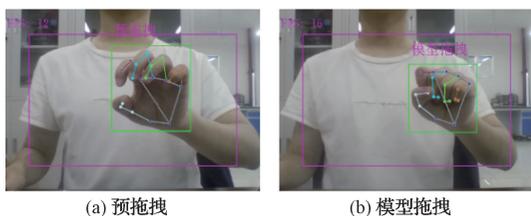


图 10 模型拖拽 A_3 演示效果

4) 模型放大 A_4

此动作控制数字模型的特征放大。当五指动作为指尖全部为“向上”即五指均处于 U_f ,开始以当前索引点食指一指间关节的坐标点为中心点进行模型放大。若需以其他特征点进行放大,即需利用动作 A_1 移动索引点食指

一指间关节至特征点,重复模型放大动作 A_4 。由此实现对数字模型特征的放大,记为 B_{A_4} 。

$$A_4 = \{1, 1, 1, 1, 1\} \quad (21)$$

$$A_4 = B_{A_4} + A_1 \quad (22)$$

图 11 所示为通过手掌移动动作 A_1 选中某一特征点之后进行模型放大动作 A_4 。

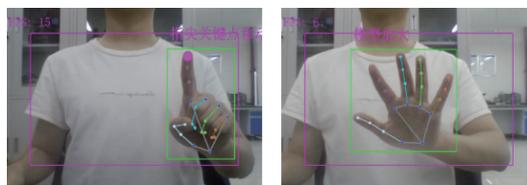


图 11 模型放大 A_4 演示效果

5) 模型缩小 A_5

此动作控制数字模型的特征缩小。当五指指尖除拇指“向下”为 D_f 其余四指均为“向上” U_f 时,同样开始以当前索引点食指一指间关节的坐标点为中心点进行模型缩小。与 A_4 动作相同,可利用 A_1 动作对其他特征点实现缩小效果,记为 S_{A_4} 。

$$A_5 = \{0, 1, 1, 1, 1\} \quad (23)$$

$$A_5 = S_{A_4} + A_1 \quad (24)$$

图 12 所示为通过手掌移动动作 A_1 选中某一特征点之后进行模型放大缩小 A_5 。

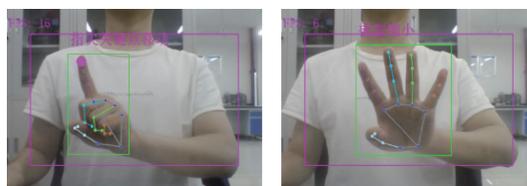


图 12 模型缩小 A_5 演示效果

3 实验与分析

为验证本文设计的手势交互系统的有效性,利用搭建好的软件模型和硬件设施,模拟历史博物馆中幻影成像系统的使用,在 PC 建立古塔建筑物幻影成像投影模型,对系统进行交互测试,在实验环境中成功实现了幻影成像交互系统的可视化运行,实验结果如图 13 所示。

由于使用以上模型对手势动作检测时可理解为对 5 类动作的检测,故在对准确率进行评估时,可使用衡量分类模型中的常用方法即混淆矩阵。

在对定义动作指令进行测试时,由 4 名实验者进行 5 类动作指令的交互测试,单一手势交互指令测试 50 次/人,共计 200 次,最终得到样本测试总数 1 000 次,根据测试结果得到混淆矩阵如图 14 所示。

通过实验得到的混淆矩阵,可以得到每种手势动作在实验检测时的正确个数,但只凭个数无法具体衡量该模型的优劣,故在混淆矩阵的统计结果上延伸如下 3 个指标即

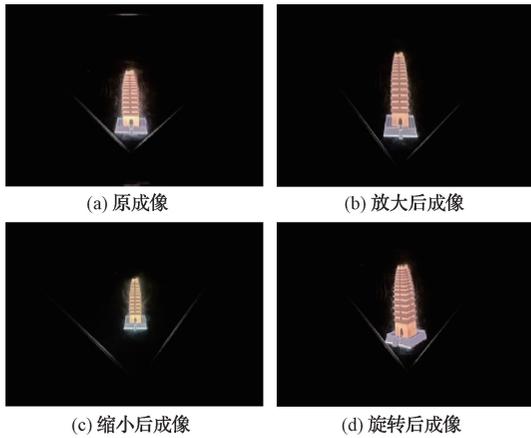


图 13 幻影成像不同手势动作交互实验效果

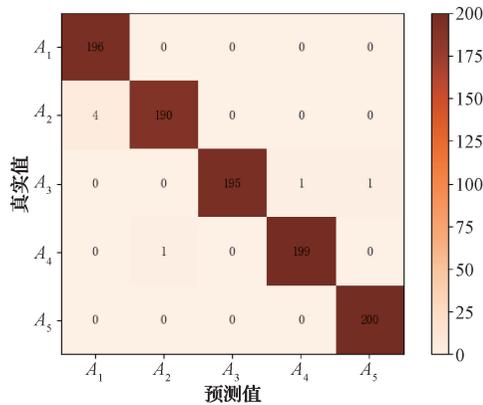


图 14 手势检测实验结果混淆矩阵

检测的精确度 P_r 、召回率 R_e 和模型的准确率 A_e 对模型进行更标准化的衡量。

P_r 表示精确度即正样本且预测正确的数量占所有模型认为正样本的比例。 R_e 表示召回率即正样本且预测正确的数量占所有正样本的比例。 TP 表示正样本预测为正样本的个数； TN 表示正样本预测为负样本的个数； FP 表示负样本预测为正样本的个数； FN 表示负样本预测为负样本的个数^[20]。

$$P_r = \frac{TP}{TP + FP} \quad (25)$$

$$R_e = \frac{TP}{TP + FN} \quad (26)$$

在实验环境下对定义的交互手势进行测试,测试结果如表 2 所示。

由实验结果可知,在对定义动作指令进行测试时,共计测试样本数 1 000 次,其中正确交互次数 980 次,未实现交互次数 20 次,整体检测模型的准确率达到 98%。

A_1 的准确率和 A_2 的召回率偏低分析是由于 Media-pipe 手掌检测模型在背景环境复杂时对手掌分割不精确及相似动作之间的判别不准确导致;另外当前模型和设备对动作信息的获取帧率不高也会造成识别过程中部分语

表 2 手势动作检测准确指标

手势动作	TP	FP	TN	FN	Pr/%	Re /%	准确率/%
A_1	196	0	786	4	98.0	100	
A_2	190	4	597	1	99.5	97.9	
A_3	195	2	790	0	100	99.0	98
A_4	199	1	786	1	99.5	99.5	
A_5	200	0	785	1	99.5	100	

义信息丢失,导致出现识别不准确的问题。后续研究中将持续改进。

目前针对幻影成像的手势交互研究以红外传感器为主,本文与张蒙蒙等^[21]提出的通过红外传感器阵列进行幻影成像手势交互系统做出对比,同样以右挥手势为实验动作,识别结果如图 15 所示。

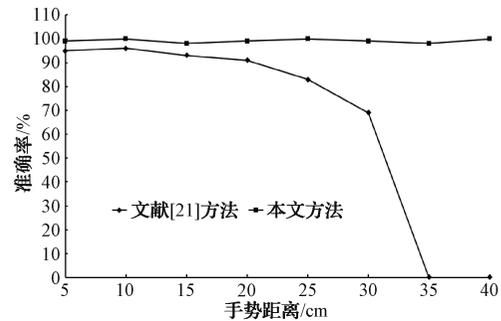


图 15 文献[21]与本文方法在 0~40 cm 识别对比

在对右挥手势的识别上,文献[21]提出的幻影成像手势识别系统对距离要求苛刻,5~35 cm 外识别精度逐渐降低,35 cm 外手势交互系统不再有效工作。本文提出的方案精度明显提高且准确率相对稳定。此外,本文结合幻影成像装置设计中提出的手势交互最优捕获位置,克服了红外传感器对手势交互距离限制的缺陷,实现了 150 cm 范围内的手势交互如图 16 所示,且能保持稳定较高的识别精度。

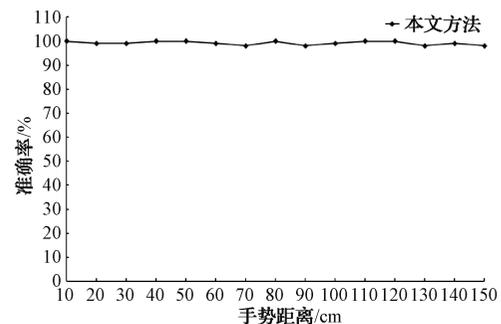


图 16 本文方法在 0~150 cm 范围内识别精度

Media-pipe 是利用机器学习建立手掌检测模型,从骨骼信息特征点的角度进行手势识别并实现对幻影成像的控制,在自适应性强的基础上又能保证实时精准的识别。

目前本文提出的手势交互系统方案仍有不足。在未来的研究工作中,一方面将着力于优化手势判别阈值选取方法,提高手势识别精度;另一方面将通过引入空间内手势的深度信息,来弥补当前方法在昏暗的应用场景中无法采集到完整手势数据的缺陷,丰富手势交互的应用场景。

4 结 论

本文采用计算机视觉实现了幻影成像系统中的人机交互。在成像硬件上设计了更符合人机关系的单目相机位置,软件上以手动动作作为交互方式,引入了 Mediapipe 机器学习管道,构建了手掌模型并与单目相机捕获的手部进行实时结合,在识别静态手势动作的基础上,通过手指的不同状态定义了幻影成像交互过程中的 5 种动作指令控制幻影成像,并且满足了实际交互体验中不同的指令需求,同时保证了后续研究中手势交互动作开发的拓展性。在规定的目标识别区域内,实际测试准确精度达到 98%,验证了该系统的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] 谭婧,杨梓琰,曾莉洁,等. 基于嵌入式平台的伪全息 3D 动态展示系统的研究[J]. 电子技术与软件工程, 2018(8):196.
- [2] 陈思佳,罗志增. 基于长短时记忆和卷积神经网络的手势肌电识别研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 162-170.
- [3] EPPS J, LICHMAN S, WU M. A study of hand shape use in tabletop gesture interaction[C]. CHI'06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, 2006: 748-753.
- [4] BEN G, MICHEL E, ANNWEILER C, et al. Human fall detection using passive infrared sensors with low resolution: A systematic review[J]. Clinical Interventions in Aging, 2022, 17(1): 35-53.
- [5] 徐军. 基于计算机视觉的手势识别及人机交互技术的应用研究[D]. 南京:东南大学, 2018:2-4.
- [6] SHETH P, BHIDASNA H, BHIDASNA Z. Gesture recognition using magic ring sensor [J]. International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 2016, 3(6): 236737.
- [7] 于昌立,范书瑞,刘洋. 基于数据手套的无人机端侧控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(12): 40-47.
- [8] CHANG W, KEER W, QING C, et al. Development of a low-cost wearable data glove for capturing finger joint angles[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 1-20.
- [9] APOORV S, BHOWMICK S K, PRABHA R S. Indian sign language interpreter using image processing and machine learning[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 872(1): 012026.
- [10] KOFMAN J, VERMA S, WU X. Robot-manipulator teleoperation by marker less vision-based hand-arm tracking[J]. International Journal of Optomechatronics, 2007, 1(3): 331-357.
- [11] ZHOU H, XIE L, FANG X. Visual mouse: SIFT detection and PCA recognition[C]. 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops (CISW 2007). IEEE, 2007: 263-266.
- [12] 王剑波,朱欣娟,吴晓军. 融合静态手势特征和手部运动轨迹特征的手势交互方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(7): 14-18.
- [13] 王晓华,李才顺,胡敏,等. 服务机器人手势识别系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 305-311.
- [14] NAKANO K, SATOH R, HOSHI A, et al. Non-contact imaging of venous compliance in humans using an RGB camera[J]. Optical Review, 2015, 22(2): 335-341.
- [15] 杨朝,杨鹏程,张蒙蒙,等. 投影式幻影成像中局域几何畸变的校正方法研究[J]. 光子学报, 2022, 51(3): 1-13.
- [16] 丛玉华,何啸,邢长达,等. 基于计算机视觉手势识别的人机交互技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(1): 152-160.
- [17] LUGARESI C, TANG J, NASH H, et al. Mediapipe: A framework for building perception pipelines[C]. CoRR, 2019.
- [18] DOKANIA H, CHATTARAJ N. An assistive interface protocol for communication between visually and hearing-speech impaired persons in internet platform[J]. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, 2022: 1-14.
- [19] HARRIS M, AGOES A S. Applying hand gesture recognition for user guide application using Media Pipe[C]. 2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021), 2021: 101-108.
- [20] 宋灿,吴谨,朱磊,等. 一种自适应上采样的光伏面板分割算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(7): 1485-1491.
- [21] 张蒙蒙,代阳,杨鹏程,等. 幻影成像装置的自然手势识别系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(5): 63-67.

作 者 简 介

孟杰,硕士研究生,主要研究方向为幻影成像、图像处理。

E-mail: 1229887945@qq.com