

文章编号: 2095-2163(2022)09-0143-07

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

人体关键点升维算法及其在游戏交互中的应用

李长鑫, 黄海于

(西南交通大学 计算机与人工智能学院, 成都 610031)

摘要: 针对传统基于 RGB 图像的人体关键点检测算法只能得到关键点 2D 坐标的问题, 本文提出了一种基于双目视觉的人体关键点升维方法。该方法首先对 2 个 RGB 摄像头同时拍摄的人体图像进行关键点检测, 然后根据检测到的人体关键点的 2D 坐标, 结合摄像头的内外参数, 采用几何计算的方法, 将人体关键点从像素坐标系下的 2D 坐标升维到世界坐标系下的 3D 坐标。该方法可在不需要 RGB-D 相机和激光雷达等硬件的情况下, 实现人体关键点的 3D 定位。该算法应用到第三人称游戏中, 可实现游戏内玩家角色的运动控制及人机交互的目的, 在实际测试中达到了较好的演示效果。

关键词: 人体关键点检测; 升维方法; 第三人称游戏; 人机交互

The human key points dimension-ascending algorithm and its application in game interaction

LI Changxin, HUANG Haiyu

(School of Computing and Artificial Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

【Abstract】 Aiming at the problem of traditional human key point detection algorithm that can only obtain the 2D coordinates of the human key points in the pixel coordinate system, a dimension-ascending algorithm based on binocular vision is proposed. The method firstly detects the 2D position of human key points in the images captured by the two RGB cameras at the same time. Then combined with the internal and external parameters of the camera through geometric calculation, the 2D position can be transformed to the 3D position. This method does not require expensive hardware such as RGB-D cameras and lidars and can get high precision position of human key points in 3D coordinate. The algorithm can be used in third-person games, which could achieve the purpose of human-computer interaction. Through interaction test, it gets the good demonstration effect.

【Key words】 human key points detection; dimension-ascending algorithm; third-person game; human-computer interaction

0 引言

随着信息技术的不断进步, 人机交互技术在计算机领域的作用显得越发重要。目前, 对于符合人类交流习惯的“自然”智能人机交互技术研究已经引起学界高度关注, 大量科研人员投身到人体姿态、手势、肢体动作、人脸表情、语音等方式的人机交互研究中。人机交互技术正在逐步从以计算机为中心转变为以人为中心^[1]。

在游戏娱乐方面, 使用键盘、鼠标操作的游戏已然无法满足用户体验的多样化需求。因此, 为了提高用户体验, VR 游戏应运而生。传统的 VR 游戏通常需要笨重的辅助设备, 在加大了游戏玩家负担的同时, 也增加了成本。为了解决上述问题, 基于计算机视觉技术的体感游戏已日益受到人们的关注重视。该交互方式通常依赖于人体关键检测算法, 通过算法得到人体关键点坐标信息, 控制游戏内玩家

角色的运动, 从而实现与游戏内容的交互。

针对人体关键点检测算法只能对单一 RGB 图像进行 2D 关键点检测的问题, 本文提出了一种将像素坐标系下 2D 人体关键点坐标升维至世界坐标系下 3D 人体关键点坐标的方法, 实现了仅通过 2 个 RGB 摄像头, 便可实时获取游戏玩家在世界坐标系下的 3D 关键点信息, 从而控制游戏中玩家角色的骨骼动画, 以此达到控制游戏中玩家角色位置移动、姿态变化、操作触发等一系列交互操作的目的。

1 相关研究

在基于人体关键点检测的游戏交互应用中, 如何实现对人体关键点在现实空间中的三维定位、尤其是深度信息的获取, 即已成为研究的重点和难点。按照定位原理的不同, 这类游戏的交互主要采用结构光、TOF 和双目立体视觉等交互方式。

作者简介: 李长鑫(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机视觉与人机交互; 黄海于(1970-), 男, 副教授, 主要研究方向: 计算机应用和人机交互。

收稿日期: 2022-02-23

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

1.1 基于结构光的游戏交互

结构光的交互方法是通过投影仪,将 IR 红外光投射到被测物体表面,用摄像机拍摄被测物体采集结构光图像。若已知摄像机坐标系与投影仪坐标系之间的相对位置关系,则可求解出被测物体上的光条在摄像机坐标系或者投影仪坐标系中的具体坐标^[2]。该方法的精度范围为 mm 到 cm 之间,由于需要投影和摄像机等辅助设备,该类产品价格普遍都比较贵,通常在几千到几十万不等,代表产品有 Kinect1.0^[3]、RealSense^[4]。此外,应用该类方法的产品还存在受光照影响较大、响应较慢的缺点。

1.2 基于 TOF 的游戏交互

时间飞行法(Time of Flight, TOF)通过发射连续的光脉冲到被观测物体上,并接收从物体反射回来的光脉冲。通过探测光脉冲的飞行时间,计算被测物体与相机间的距离^[5]。该方法的精度范围为 μm 到 cm 之间,需要发射器和检测器作为辅助设备,存在价格昂贵(高精度的设备价格可达上百万)、受强光影响大的缺点。代表性产品有 Kinect2.0。

1.3 基于双目立体视觉的游戏交互

双目立体视觉是将 2 个完全相同的摄像头平行放置,同步采集前方图像。由于 2 个摄像头位置不同,对同一目标点所采集的图像必然存在一定的像素差(视差),由视差可计算出目标点到双目摄像头的距离^[6],该类方法的精度通常在 cm 级。考虑到传统的双目立体视觉方法需要借助于立体匹配,即使得该类方法存在算法复杂度高、受光照影响大、精度不高的缺点。代表性产品有 Leap Motion^[7]等。由于此类方法的效果并不理想,因此目前没有典型的应用场景,大多只用于学术研究。

2 本文方法

本文方法是对传统基于双目立体视觉方法的改进。本方法依托于 2D 人体关键点检测算法,直接对 2D 人体关键点检测结果升维,得到该关键点在世界坐标系下的三维坐标。与传统的基于双目立体视觉方法相比,该方法不需要立体匹配算法,只依赖于深度学习算法对人体关键点的检测结果,受光照等环境影响小,故可以应用于复杂场景。并且,也同样都不需要建立视差图,因此大大减小了算法的时间复杂度,在保证结果精度的同时,极大提升了算法的效率,更适用于游戏的实时应用场景。此外,直接对 2D 关键点进行升维,也在一定程度上避免了误差的累积。

2.1 坐标系与坐标转换

在计算机视觉领域主要有 4 种坐标系,分别是:世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 、相机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) 、图像坐标系 (x, y) 、像素坐标系 (u, v) 。

从世界坐标系到像素坐标系之间的转换关系可表示为:

$$\begin{matrix} \hat{e}^u \\ \hat{e}^v \\ \hat{e}^1 \end{matrix} \hat{u} = \mathbf{K} \cdot \begin{matrix} \hat{e}^R \\ \hat{e}^T \\ \hat{e}^0 \end{matrix} \begin{matrix} T \\ 1 \\ 1 \end{matrix} \begin{matrix} \hat{e}^{X_w} \\ \hat{e}^{Y_w} \\ \hat{e}^{Z_w} \\ \hat{e}^1 \end{matrix} \hat{u} \quad (1)$$

其中, \mathbf{K} 为相机的内参矩阵; \mathbf{R} 为旋转矩阵; \mathbf{T} 为偏移向量(\mathbf{R} 、 \mathbf{T} 又称作相机的外参); \mathbf{Z}_c 表示尺度因子。

由此可见,如果知道相机的内参矩阵 \mathbf{K} 、旋转矩阵 \mathbf{R} 和偏移向量 \mathbf{T} ,就可以实现从像素坐标系到世界坐标系的转化。相机的内参矩阵和外参均可以通过相机标定得到。

2.2 相机外参标定

内参矩阵 \mathbf{K} 是相机的固有属性,可通过张正友标定^[8]来获得,通常情况下不会改变,因此只需要标定一次。

外参表示的是相机在世界坐标系中的位置和姿态,需要将相机悬挂好后,再进行标定,而且只要移动一次相机,就必须重新对外参进行标定。

本文以地面作为标定的基准面进行相机外参标定,建立如图 1 所示的世界坐标系。因地面上所有点的 Z 坐标均为 0,则只需要知道相机相对于地面的关系,就可求出相机外参。由于确定一个平面至少需要 3 个点,因此只需要指定 4 个地面上的参考点,再通过相机的内参矩阵代入式(1)即可求得旋转矩阵 \mathbf{R} 和偏移向量 \mathbf{T} 。

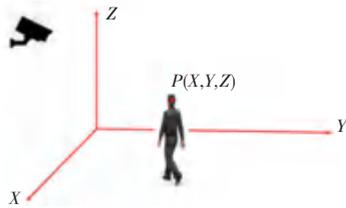


图 1 指定的世界坐标系

Fig. 1 Specified world coordinate system

2.3 升维原理

为了实现通过像素坐标系 (u, v) 反求该空间点所对应的世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) ,可将式(1)变形得到式(2):

$$\begin{pmatrix} \hat{e}X_w \hat{u} \\ \hat{e}Y_w \hat{u} \\ \hat{e}Z_w \hat{u} \\ \hat{e}1 \hat{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{e}K \\ \hat{e}0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{e}R \\ \hat{e}0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T \hat{u} \\ 1 \hat{u} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{e}Z_c \\ \hat{e}1 \hat{u} \end{pmatrix} \quad (2)$$

通过分析式(2)可知,内参矩阵 K 、旋转矩阵 R 、偏移向量 T 均已通过相机标定得到,只有尺度因子 Z_c 未知。

为求得尺度因子 Z_c ,还需要借助世界坐标系到相机坐标系的转换关系,其数学公式见如下:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}X_c \hat{u} \\ \hat{e}Y_c \hat{u} \\ \hat{e}Z_c \hat{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{e}X_w \hat{u} \\ \hat{e}Y_w \hat{u} \\ \hat{e}Z_w \hat{u} \end{pmatrix} + T \quad (3)$$

在已知 Z_w 的情况下,可求出 Z_c 。而当被测点在地面上时,即 $Z_w = 0$,通过式(3)即可求得尺度因子 Z_c ,再将尺度因子 Z_c 代入式(2)就可求得 $(X_w, Y_w, Z_w = 0)$ 。

综上所述,在已知 $Z_w = 0$ 时,可以实现从像素坐标 (u, v) 到世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 的转换。

在实际应用中,并不能保证被测点一定是在地面上,即被测点的 $Z_w \neq 0$, Z_w 的值通常未知,该情况需要采用双镜头对该点同时检测的方式求得,原理如图2所示。

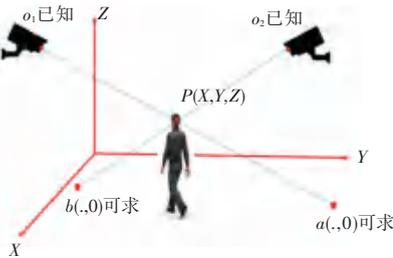


图2 双目定位原理

Fig. 2 Binocular positioning principle

设待定位的空间点为 P ,摄像头1、2的相机坐标系原点分别为 o_1, o_2 ; P 通过摄像头1、2的投影点分别为 a, b 。此时点 a, b 的世界坐标的 Z 坐标 Z_w 均为0,投影点 a 的世界坐标 $(X_{wa}, Y_{wa}, Z_{wa} = 0)$ 与投影点 b 的世界坐标 $(X_{wb}, Y_{wb}, Z_{wb} = 0)$ 均可通过式(2)求出,摄像头 o_1 的世界坐标 $(X_{w01}, Y_{w01}, Z_{w01})$ 和摄像头 o_2 的世界坐标 $(X_{w02}, Y_{w02}, Z_{w02})$ 可通过式(3)求得。通过 o_1 与 a 可确定空间直线 l_1 ,通过 o_2 与 b 可确定空间直线 l_2 , l_1 与 l_2 的交点即为 P 的世界坐标。

2.4 解空间直线方程的近似方法

在图2中,由于 l_1 和 l_2 是2条空间直线,当两直线平行或者不共面时,则方程无解,而在本文算法应用场景中,不会出现两直线平行的情况。由于2D

关键点检测算法精度的影响,两摄像头对空间中同一点的检测总会存在偏差,因此造成两直线不共面、而方程无解的情况。为了解决该问题,本文提出以下方法求解空间直线方程。

解空间直线方程示意如图3所示,在已知 A, B, C, D 四个空间点的情况下,求 AB 与 CD 的交点 O ,过点 ABC 作平行四边形 $ABEC$,根据相似三角形法则,可知 $S_{ACD}/S_{CDE} = AO/AB$ 。而三角形 ACD 与三角形 CDE 的面积可以通过空间向量的叉积公式求得,即可求出 AO 与 AB 的比例关系,最终求得交点 O 的三维坐标。

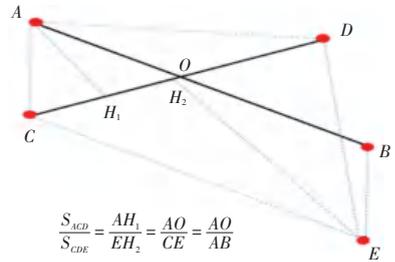


图3 解空间直线方程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of solving the equation of a straight line in the space

在图2中,已知摄像头 o_1 的世界坐标 $(X_{w01}, Y_{w01}, Z_{w01})$ 和 o_2 的世界坐标 $(X_{w02}, Y_{w02}, Z_{w02})$,投影点 a 的世界坐标 $(X_{wa}, Y_{wa}, Z_{wa} = 0)$ 与 b 的世界坐标 $(X_{wb}, Y_{wb}, Z_{wb} = 0)$ 。根据上述原理,空间点 p 的世界坐标 (X_{wp}, Y_{wp}, Z_{wp}) 可通过式(4)求出:

$$(X_{wp}, Y_{wp}, Z_{wp}) = \frac{|\vec{o_1a} \times \vec{bo_2}|}{|\vec{o_1b} \times \vec{ao_2}|} \vec{o_1a} + (X_{w01}, Y_{w01}, Z_{w01})$$

其中:

$$\begin{aligned} \vec{o_1a} &= (X_{wa}, Y_{wa}, Z_{wa}) - (X_{w01}, Y_{w01}, Z_{w01}) \\ \vec{o_1b} &= (X_{wb}, Y_{wb}, Z_{wb}) - (X_{w01}, Y_{w01}, Z_{w01}) \\ \vec{bo_2} &= (X_{w02}, Y_{w02}, Z_{w02}) - (X_{wb}, Y_{wb}, Z_{wb}) \end{aligned} \quad (4)$$

该方法在有解情况下与常规方法结果相同,在两直线不共面的情况下,也可以得到一个近似解,而且易于编程,满足应用需求。但是,解的精确度与两摄像头的摆放位置相关,当两摄像头的光轴越接近于平行,解的误差越大。因此实际应用时,悬挂摄像头时应使两光轴有一定角度,并经过多次测试选择解的精度最高的悬挂方式。

2.5 算法流程及复杂度分析

该升维算法可划分为相机标定、升维结果计算两个阶段。对此拟做阐释分述如下。

(1) 相机标定阶段。是整个算法流程的准备阶段, 仅需进行一次, 因此该阶段所耗费的时间可以忽略不计, 误差主要来自于张正友标定^[8]方法本身的误差和测量误差。该阶段的目的是为获取两摄像头的内参矩阵 \mathbf{K} 、旋转矩阵 \mathbf{R} 和偏移向量 \mathbf{T} , 并由此计算出两摄像头原点的世界坐标。计算世界坐标的伪代码。

算法 1 计算摄像头原点的世界坐标

输入 \mathbf{K} : 摄像头内参矩阵; \mathbf{R} : 摄像头旋转矩阵; \mathbf{T} : 摄像头偏移向量

输出 \mathbf{O} : 摄像头原点的世界坐标 $(X_{w_0}, Y_{w_0}, Z_{w_0})$

// 摄像机原点在相机坐标系下的坐标均为 0

$\mathbf{Cam_zero} = [0.0, 0.0, 0.0]$

// 将公式(3)变形, 并将 $\mathbf{Cam_zero}$ 代入求出其世界坐标

$\mathbf{O} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{Cam_zero} - \mathbf{T})$

END

(2) 升维结果计算阶段。算法伪代码详见如下。

算法 2 升维结果计算

设关键点的数量为 n

输入 $\mathbf{Image}_1, \mathbf{Image}_2$ 分别由摄像头 1, 摄像头 2 拍摄的 2 张图片; $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$: 2 个摄像头的内参矩阵; $\mathbf{R}_1, \mathbf{T}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{T}_2$: 2 个摄像头的外参; $\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2$: 2 个摄像头的世界坐标

输出 $\mathbf{Results}$: 两摄像头同时拍摄到的人体关键点三维坐标集合, 为 $n * 3$ 的列表

// 通过 $\mathit{openpose}^{[9]}$ 或 $\mathit{pifpaf}^{[10]}$ 等 2D 人体关键点检测算法得到的二维坐标集合, 为 $n * 2$ 的列表

$\mathit{Keypoints}_1 \leftarrow \mathit{Human_keypoint_detect}(\mathit{image}_1)$

$\mathit{Keypoints}_2 \leftarrow \mathit{Human_keypoint_detect}(\mathit{image}_2)$

初始化 $\mathbf{Results} = []$

FOR $i \leftarrow 1$ TO n DO

// 如果该关键点同时被 2 个摄像头捕捉到, 则升维

IF $p_{1i} \in \mathit{Keypoints}_1$ AND $p_{2i} \in \mathit{Keypoint}_2$

// 计算空间点 i 分别相对于摄像头 1 和摄像头 2

在地面上的投影坐标, 原理见 2.3 节

令 $Z_{w_1} = 0, Z_{w_2} = 0$

$$X_{w_1}, Y_{w_1} \leftarrow (\mathbf{K}_1 \cdot \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}_1 \mathbf{R}_1 & \mathbf{T}_1 \\ \hat{\mathbf{e}}_1 \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix})^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{c1} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}_1 p_{1x} \\ \hat{\mathbf{e}}_1 p_{1y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$X_{w_2}, Y_{w_2} \leftarrow (\mathbf{K}_2 \cdot \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}_2 \mathbf{R}_2 & \mathbf{T}_2 \\ \hat{\mathbf{e}}_2 \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix})^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{c2} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{e}}_2 p_{2x} \\ \hat{\mathbf{e}}_2 p_{2y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

// 该空间点的 2 个地面投影的世界坐标

$$\mathbf{W}_1 = [X_{w_1}, Y_{w_1}, 0.0]$$

$$\mathbf{W}_2 = [X_{w_2}, Y_{w_2}, 0.0]$$

// 按式(4)原理构建空间向量

$$\vec{o_1 a} = \mathbf{W}_1 - \mathbf{O}_1$$

$$\vec{o_1 b} = \mathbf{W}_2 - \mathbf{O}_1$$

$$\vec{bo_2} = \mathbf{O}_2 - \mathbf{W}_2$$

$$[X_{w_{pi}}, Y_{w_{pi}}, Z_{w_{pi}}] \leftarrow \text{公式(4)}$$

// 更新 $\mathbf{Results}$

$\mathbf{Results.append}([X_{w_{pi}}, Y_{w_{pi}}, Z_{w_{pi}}])$

END IF

END FOR

END

该阶段为整个算法流程的核心, 所耗费的时间主要取决于 2D 人体关键点检测算法, 其余部分时间复杂度均为常数。误差主要来源于 2D 人体关键点检测算法的误差以及求解空间直线方程时产生的误差。

3 实验结果与分析

3.1 定量结果分析

为定量测试升维算法的准确度, 对该升维算法在 $250 \text{ cm} * 250 \text{ cm}$ 的空间内进行了测量。测量详情见图 4。图 4 中, 在一把椅子上标注 4 个检测点, 不断移动椅子的位置, 通过升维算法对椅子的检测点进行定位, 并比较预测位置与实际位置的误差。



图 4 升维算法定量测试

Fig. 4 Quantitative test of dimension-ascending algorithm

共进行了 9 组实验, 具体结果见表 1。表 1 中, 单位均为 cm , 且保留整数。分析表 1 中数据, 可得出结论: 在本文实验条件下, 该升维算法的平均绝对误差为 2.105 cm 。

表 1 升维算法定量测试结果

Tab. 1 Quantitative test results of dimension-ascending algorithm cm

组号	组内编号	X	Y	Z	pred_X	pred_Y	pred_Z	distance
1	1	65	0	85	66	1	86	1.732
	2	31	0	85	29	1	83	3.000
	3	65	36	42	64	36	40	2.236
	4	31	36	42	32	37	44	2.449
2	1	125	0	85	127	1	86	2.449
	2	91	0	85	93	0	83	2.828
	3	125	36	42	123	35	40	3.000
	4	91	36	42	93	35	40	3.000
3	1	193	0	85	191	1	86	2.449
	2	159	0	85	160	2	83	3.000
	3	193	36	42	191	37	41	2.449
	4	159	36	42	159	35	43	1.414
4	1	65	86	85	65	85	86	1.414
	2	31	86	85	33	88	83	3.464
	3	65	122	42	65	122	42	0
	4	31	122	42	33	124	43	3.000
5	1	125	86	85	123	86	86	2.236
	2	91	86	85	93	87	85	2.236
	3	125	122	42	127	122	42	2.000
	4	91	122	42	90	121	42	1.414
6	1	193	86	85	194	86	87	2.236
	2	159	86	85	161	86	83	2.828
	3	193	122	42	194	124	41	2.449
	4	159	122	42	159	121	42	1.000
7	1	65	199	85	63	201	84	3.000
	2	31	199	85	31	198	85	1.000
	3	65	235	42	67	235	42	2.000
	4	31	235	42	33	234	41	2.449
8	1	125	199	85	125	199	87	2.000
	2	91	199	85	92	201	86	2.449
	3	125	235	42	125	236	40	2.236
	4	91	235	42	91	235	42	0
9	1	193	199	85	193	201	86	2.236
	2	159	199	85	158	198	84	1.732
	3	193	235	42	194	235	41	1.414
	4	159	235	42	160	235	42	1.000

3.2 可视化结果分析

本文将 *PifPaf*^[10] 作为 2D 人体关键点检测器, 并定义了一系列的关键点, 见表 2。同时, 又将 *PifPaf* 的检测结果进行升维, 得到每个关键点的三维世界坐标。

表 2 关键点定义
Tab. 2 Key points definition

序号	英文名称	中文名称
1	neck	颈
2,3	l_clavicle, r_clavicle	左锁骨, 右锁骨
4	pelvis	盆骨
5	lowerspine	下脊椎
6,7	l_shoulder, r_shoulder	左肩, 右肩
8,9	l_elbow, r_elbow	左肘, 右肘
10,11	l_wrist, r_wrist	左腕, 右腕
12,13	l_hip, r_hip	左臀, 右臀
14,15	l_knee, r_knee	左膝, 右膝
16,17	l_ankle, r_ankle	左脚踝, 右脚踝

本文通过 2 个 RGB 摄像头先进行 2D 人体关键点检测、再进行升维的方法, 能够得到较好的效果, 并达到实际项目应用要求, 测试效果如图 5 所示。

3.3 交互测试结果分析

为了达到游戏玩家通过动作变化来控制第三人称游戏中玩家角色模型运动、从而实现人机交互的目的, 本文将上述通过关键点升维得到的 3D 人体关键点数据, 作为游戏交互信息进行了测试。本地客户端将 3D 关键点数据以一定格式发送给游戏运行平台。游戏运行平台得到人体关键点的 3D 坐标数据后, 通过内插^[11] 或运动学分析^[12-13] 等处理方法, 来完成对游戏内玩家模型的控制。交互效果如图 6 所示。文中经交互测试可看出, 对于通过升维算法得到的 3D 关键点数据, 能够有效地用于游戏交互, 并得到较好的效果。

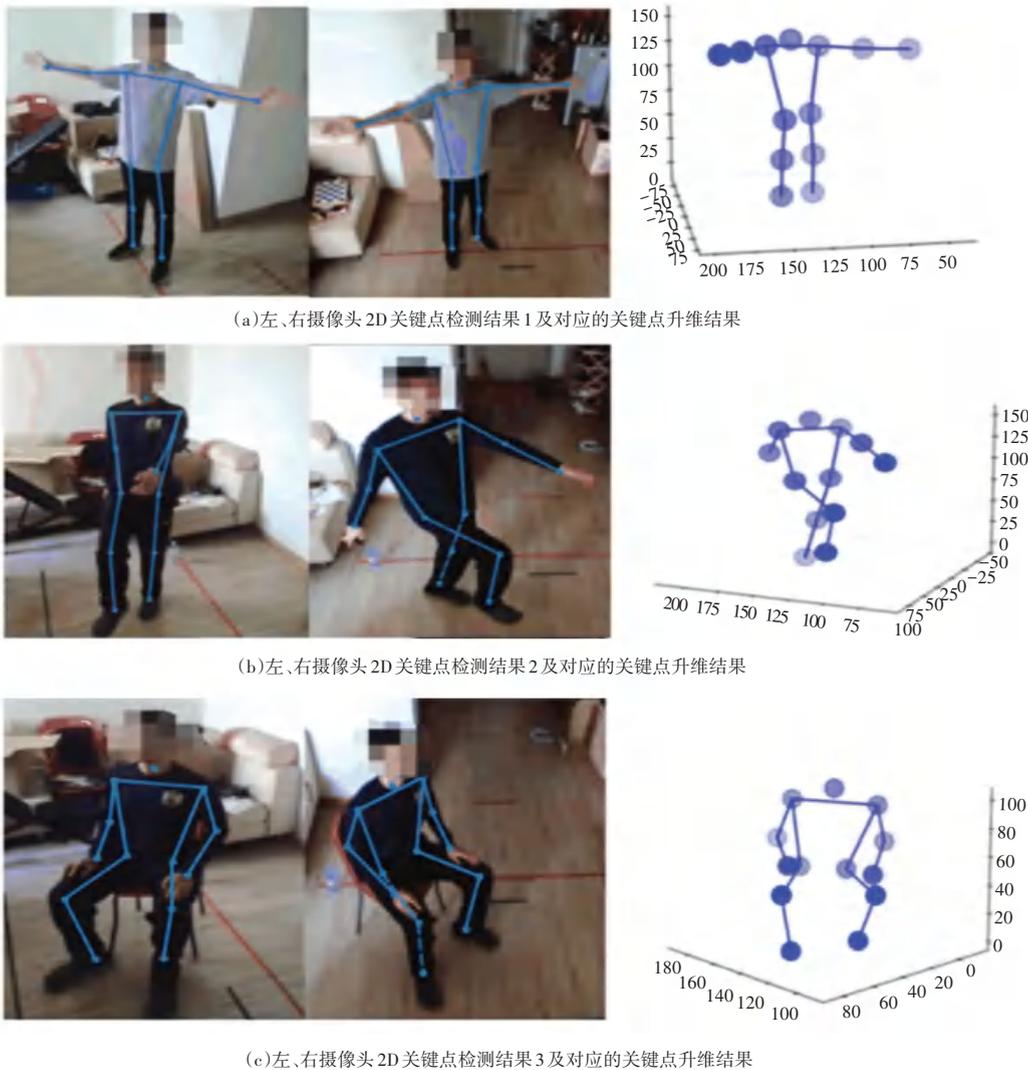


图5 升维效果

Fig. 5 Dimension-ascending effect



图6 交互结果

Fig. 6 Interaction results

4 结束语

针对RGB图片只能进行2D关键点检测问题,提出了一种通过2个普通RGB摄像头对同一关键点检测,再根据两摄像头的空间关系对像素坐标系下的2D坐标进行升维,得到其在世界坐标系下3D坐标的升维方法。经过测试,通过该方法得到的3D坐标有较高的准确度,并且可以用于对第三人称游戏玩家角色的交互。在保证玩家游戏体验的同时,降低了体感类游戏的硬件成本。此外,该升维方法有较好的拓展性,可用于各种场景。

参考文献

- [1] 高楠,傅俊英,赵蕴华. 人机结合的研究现状与进展[J]. 高技术通讯,2015,25(02):205-218.

(下转第153页)