

张龔, 王子源, 张昕倚, 等. 基于微惯性传感器的 AR 设备手势交互实现[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 107-113.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241014

基于微惯性传感器的 AR 设备手势交互实现

张龔, 王子源, 张昕倚, 费骏豪, 韩华

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 当今 AR 技术在用户与设备交互体验上还存在着诸如设备体积过大, 设备生产成本较高, 交互实时性较差的的短板, 故本文创新性地提出了 AR 设备手势交互实现方案。该设备应用 2 个微惯性传感器佩戴在用户食指与拇指之上, 主动测量出两手指标志点的各个运动信息, 然后使用这些数据, 解算出相应的检测点在某一相对固定的归一化坐标系下的空间位置; 并结合基于本文提出的 2 套检测机制所构建的多种可识别标志点运动模式, 以实现手势的识别工作。最后, 相应的识别结果在用户的 AR 显示器中予以即刻反馈, 进而实现手势交互功能。性能测试实验证明, 本文所提出的硬件实例方案上的 AR 设备手势交互实现方案在手势识别正确率、设备质量以及功耗上均具有一定优势。

关键词: 手势交互; 微惯性传感器; 增强现实技术; 特征提取

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0107-07

Implementation of MEMS-inertial-sensor-based gesture interaction function used on AR devices

ZHANG Yan, WANG Ziyuan, ZHANG Xinyi, FEI Junhao, HAN Hua

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The current augmented reality technology has certain limitations in terms of user-device interaction experience, such as large device size, high device production costs and poor real-time interaction. This paper proposes an innovative AR device gesture interaction implementation scheme. This scheme applies two MEMS inertial sensors wearing on user's index finger and thumb to actively measure the motion information of two reference points, and then uses these data to calculate the 3D position of the corresponding detection point in a relatively fixed geodetic coordinate system. By combining multiple recognizable gesture marker motion patterns built on two sets of software detection mechanisms based on innovative design, gesture recognition can be achieved. Finally, the corresponding recognition results will be immediately fed back in the user's AR display, thus achieving gesture interaction. Performance testing shows that compared with existing theories and technologies, the AR device gesture interaction implementation scheme proposed in this paper has certain advantages in terms of gesture recognition accuracy, device quality, and power consumption on the proposed hardware instance.

Key words: gesture interaction; MEMS inertial sensor; augmented reality technology; feature extraction

0 引言

AR 技术为真实的物理世界提供了一种更加实时与智能的信息传达方式, 能够突破传统二维屏幕传达效果的局限, 把具有极强代入性与沉浸性的虚拟画面的光信号直接耦合到用户所能看到的视界之中^[1]。一方面, 比起市面上成熟的 VR 产品, AR 设备具有体积质量较小以及用户佩戴舒适度高显著

优势。另一方面, 比起尚在理论构建与验证阶段的 MR 技术而言, AR 技术已经经过市场考验, 赢得了用户的广泛喜爱。

手势交互可使用户在手指做出预设的手势模式后, 即刻在相应的设备上得到及时的反馈。其实现方式大体可分为 2 类: 借助机器视觉的手势交互技术、基于传感器的手势交互技术^[2]。虽然现在大量产品所采用的人工智能与机器视觉算法^[3]方案具

基金项目: 国家自然科学基金(62103257); 上海市自然科学基金(22ZR1426200)。

作者简介: 张龔(2000-), 男, 本科生, 主要研究方向: 模式识别, 手势交互。

通讯作者: 韩华(1983-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 目标识别与跟踪, 行人重识别, 智能计算等。Email: 2070967@mail.dhu.edu.cn

收稿日期: 2023-05-13

有很多优点,但却对设备处理速度提出较高要求,进而造成端设备制造成本提升,产品体积重量加大,以及续航恶化等一系列问题。此外,无形中也会使得设备实时性变差,一定程度上影响了用户的体验。

基于传感器的手势交互方案^[4-6],对比主流实现方式,如三维成像技术、Lighthouse 技术、光学定位技术、微惯性传感器定位技术、蓝牙 iBeacon 技术、WiFi 定位技术、UWB 定位技术、GPS 定位技术、SLAM 技术等,其技术基础在于解决如何实现标志点空间位置的获取。微惯性传感器定位技术在本文应用场景下具有突出的优势。该技术可以仅依靠惯性装置本身就能在载体内部独立地完成导航任务,不需要与外界发生任何信号联系,不仅有着高度的自主性以及便携性,同时又表现出价格低、以及体积小的特点。

基于此,本文提出了一种 AR 设备手势交互实现方案。该方案应用 2 个佩戴在用户手指上的微惯性传感器(IMU),主动测量出两标志点的各个运动信息,接着利用这些数据,解算出相应的检测点在某一相对固定的归一化坐标系下的空间位置。然后结合基于本文提出的 2 套检测机制所构建的多种可识别标志点运动模式,即可实现用户手势的识别工作。最后,相应的识别结果将在用户的 AR 现实器中即刻做出反馈,进而实现手势交互功能。

1 硬件平台

本文所使用硬件实例平台主要包括 2 个硬件装置:主要装置、辅助装置。对于主要装置,其外观示意和硬件架构分别如图 1、图 2 所示。对于传感器数据接收与处理模块,硬件架构如图 3 所示。通过 2.4 GHz 无线收发模块接收来自于传感器数据检测与发送模块所发送的相关检测点数据,并通过使用 SPI 协议的串行数据总线向传感器数据接收与处理模块中的 STM32 主控模块 I/O 端口传送相关数据。接下来,主控模块通过运行“AR 设备手势交互实现方案”,将其所接收到的相关数据进行转化,并产生可由被控设备识别的 USB HID 数据帧,用于控制被控设备上鼠标指针的动作。其后通过使用 USB 串行总线协议向拓展模块发送其所产生的数据。对于拓展模块,被控设备通过使用 Type-C 数据线与该模块直接相连,用于实现主要装置与被控设备之间的全部数据交换,以及充放电功能。对于 AR 显示与处理模块,通过将拓展模块所传递的原始视频信号转换成外置 AR 微型显示器显示模块所能理解的

视频信号,用来驱动外置 AR 微型显示模块的正常显示。最后外置 AR 微型显示模块所产生的光信号通过 1:1 分光棱镜与现实世界的视觉信息进行耦合,并将结果投射至用户眼部。

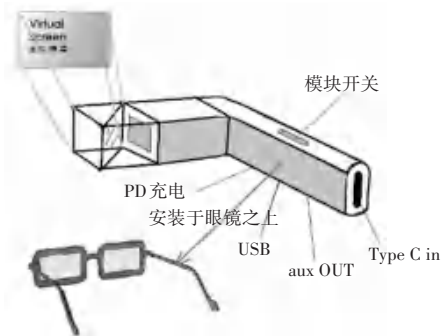


图 1 主要装置的外观示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the main device's appearance

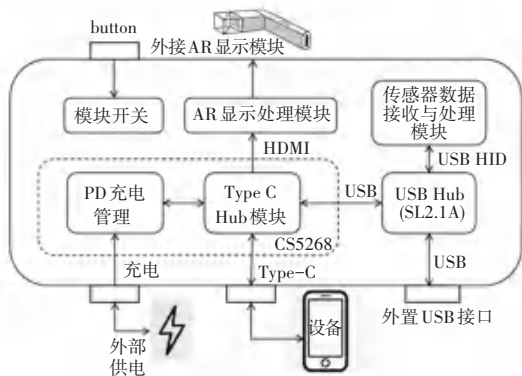


图 2 主要装置的硬件架构图

Fig. 2 Hardware architecture diagram of main devices

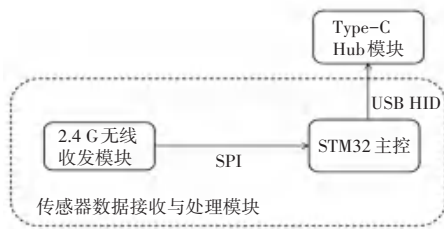


图 3 主要装置上传感器数据接收与处理模块的硬件架构图

Fig. 3 Hardware architecture diagram of the sensor data receiving and processing module on the main device

辅助装置的硬件架构如图 4 所示。在用户使用时,该模块中的 2 个 IMU 会像戒指一样被佩戴在用户的拇指与食指之上,用来跟踪并获取表征运动状态的 2 个检测点数据。稍后通过使用 I2C 协议的串行数据总线向传感器数据感测与发送模块中的 STM32 主控模块 I/O 端口传送相关数据。该主控模块在接收到该数据后,通过 2.4 GHz 无线收发模块向传感器数据接收与处理模块发送相关检测点数据。此外,装置的供电问题由在充放电管理模块监控下的锂电池来解决。

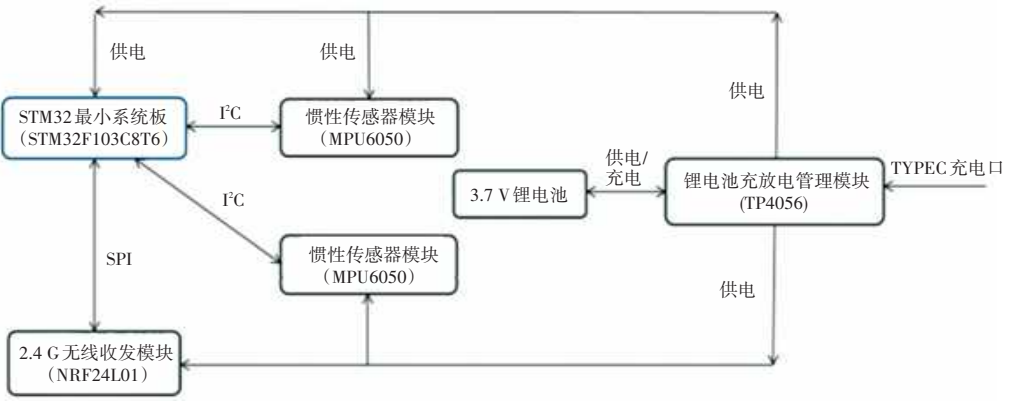


图 4 辅助装置的硬件架构图

Fig. 4 Hardware architecture diagram of supported device

2 AR 设备手势交互实现方案

本 AR 设备手势交互实现方案主要包括 5 个数据处理与分析过程。

2.1 算法过程 S1

算法过程 S1(对传感器数据发送模块发出数据的接收过程)通过相应控制函数,控制主要装置接收来自于辅助装置的传感器数据(以 2.4 GHz 无线电波形式),并将其读入到主控内存中结构体形式 IMU_Report 的某实例中暂存。该数据体形式 IMU_Report 的数据成员定义见表 1,数据成员的具体语义参如图 5 所示。

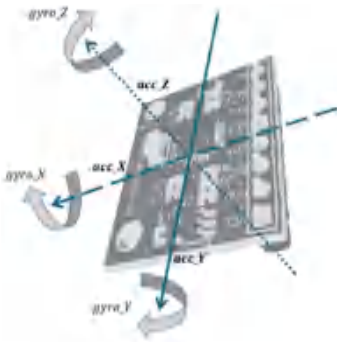


图 5 结构体形式 IMU_Report 数据成员直观展示

Fig. 5 Visual demonstration of data numbers from structure form IMU_Report

表 1 结构体形式 IMU_Report 数据成员定义

Table 1 Definition of data member from structure form IMU_Report

数据成员	变量类型	变量定义
acc_X	short	IMU 自身坐标系下 X 轴向上加速度
acc_Y	short	IMU 自身坐标系下 Y 轴向上加速度
acc_Z	short	IMU 自身坐标系下 Z 轴向上加速度
gyro_X	float	IMU 自身坐标系下 X 轴向上角加速度
gyro_Y	float	IMU 自身坐标系下 Y 轴向上角加速度
gyro_Z	float	IMU 自身坐标系下 Z 轴向上角加速度

2.2 算法过程 S2

算法过程 S2(对接收到的传感器数据进行平均滤波)通过对上述提及实例中的 6 个数据成员,应用平均值滤波^[7],用来增加数据惯性,消除数据瞬时抖动,增强数据稳定性。此后将所得结果覆写回结构体所对应的数据成员中暂存,完成传感器数据的第一次校正工作。

2.3 算法过程 S3

算法过程 S3(对滤波后传感器数据进行坐标系归一化)利用经过 S2 第一次校正后的数据,并采用加速度数据姿态解算算法,以及角速度数据姿态解算算法,求得 2 套不同的对于检测点的静态欧拉角描述(在相对固定的归一化坐标系衡量之下,默认以 Z - Y - X 作为旋转次序)^[8]。然后通过采用加权求平均的方法,对 2 套不同的数据进行融合,得到一套具有较强可靠性的检测点静态欧拉角的描述。最后,使用该静态欧拉角描述,转换得到该检测点的旋转矩阵描述,继而再通过其逆矩阵对传感器数据进行第二次校正。

算法过程 S3 包括如下 4 个数据处理分析子过程。

2.3.1 算法子过程 S3 - 1

算法子过程 S3 - 1(加速度数据姿态解算子过程)针对传感器数据检测与发送模块中的一个特定 IMU 中所采集到的加速度数据(在 IMU 坐标系下,经过 S2 滤波),利用加速度姿态解算算法得到该 IMU 所描述的检测点的静态欧拉角描述。由于位于地球上的物体总会受到大小方向恒定的重力加速度影响,故本文在假设检测点处于近似的静止状态前提下,则认为传感器所测得的加速度矢量均为相对于重力加速度矢量的偏差量。因而此时传感器所测得的加速度矢量与重力加速度矢量差向量的逆向量

即为检测点在归一化坐标系下的加速度矢量,并以此数据修正其余数据。采用这一方法,所测得数据在物体处于缓速移动或静止状态下时较为准确,但物体运动速度一旦加快则会产生较大的偏差。

算法子过程 S3 - 1, 在数理上的计算流程如后所述,借助如下公式:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_x^a \\ \hat{e}_y^a \\ \hat{e}_z^a \end{pmatrix} \dot{u} = M_x \cdot M_y \cdot M_z \cdot \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_g^0 \end{pmatrix} \dot{u} = \begin{pmatrix} \hat{e}_0^1 & 0 & 0 \\ \hat{e}_0^0 & \cos r & \sin r \\ \hat{e}_0^0 & -\sin r & \cos r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \cos p & 0 & -\sin p \\ \hat{e}_0^0 & 0 & 1 \\ \hat{e}_0^0 \sin p & 0 & \cos p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \cos y & \sin y & 0 \\ \hat{e}_0^0 -\sin y & \cos y & 0 \\ \hat{e}_0^0 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \dot{u} \\ \hat{e}_0^0 \dot{u} \\ \hat{e}_g^0 \dot{u} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, y, p 与 r 分别表示物体的静态欧拉角描述中的航向角 (yaw)、俯仰角 ($pitch$)、横摇角 ($roll$)。 M_x, M_y, M_z 分别描述了如何从归一化坐标系得到 IMU 坐标系的 3 个旋转变换步骤—绕 z 轴 (将归一化坐标系) 逆时针旋转 yaw 角, 绕 y 轴逆时针旋转 $pitch$ 角, 绕 x 轴逆时针旋转 row 角。IMU 坐标系与归一化坐标系的关系展示见图 6。式(1)中等号左侧列向量表示 IMU 所测得的加速度矢量 (在 IMU 坐标系下), 其分量 a_x, a_y, a_z 分别对应结构体形式 IMU_Report 中所定义的数据成员 acc_x, acc_y 与 acc_z 。式(1)中, 等号右侧列向量表示恒竖直向上且大小恒为 g 的重力加速度矢量。由于式(1)中等号左右两侧的列向量已知, 故可根据式(1), 计算得到物体的静态欧拉角描述 (航向角、俯仰角与横摇角)。



图 6 IMU 坐标系与归一化坐标系的关系展示图

Fig. 6 Relationship diagram between the MEMS inertial sensors' own coordinate system and the unified coordinate system

2.3.2 算法子过程 S3 - 2

算法子过程 S3 - 2 (角速度数据姿态解算子过程) 针对传感器数据检测与发送模块中的一个特定 IMU 中所采集到的角速度数据, 利用角速度姿态解算算法分别得到两检测点的静态欧拉角描述 (不同于 S3 - 1)。其实现原理及算法流程如下所述: 首先关于待求的检测点静态欧拉角的描述 y, p 与 r , 通过各个采样时间段内的静态欧拉角变化量 $\Delta y, \Delta p$ 与 Δr 在初始状态的基础上进行累加求和得到。计算公式如下:

$$\begin{cases} roll(n+1) = roll(n) + \Delta roll(n) \\ pitch(n+1) = pitch(n) + \Delta pitch(n) \\ yaw(n+1) = yaw(n) + \Delta yaw(n) \end{cases} \quad (2)$$

其中, 检测点在第 $(n+1)$ 采样时间段内所适用的静态欧拉角描述 $yaw(n+1), pitch(n+1), roll(n+1)$ 分别是由其第 n 采样时间段内所适用的静态欧拉角描述 $yaw(n), pitch(n), roll(n)$ 叠加上该采样时间段内的静态欧拉角变化量 $\Delta y(n), \Delta p(n), \Delta r(n)$ 得到的。这一计算过程称为“一次描述更新”。

其次, 关于静态欧拉角在第 n 采样时间段内所产生的变化量 $\Delta y(n), \Delta p(n)$ 与 $\Delta r(n)$ 可通过如下数理方法确定: 在下面论述中假设, 在第 n 采样时间段内, 待求的 $\Delta y(n), \Delta p(n)$ 与 $\Delta r(n)$ 已知, 构建了一种唯一表示该检测点自身坐标系下的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的角度变化量 $\Delta \varphi_x(n), \Delta \varphi_y(n)$ 与 $\Delta \varphi_z(n)$ 的数理方式。其中, $\Delta \varphi_x(n), \Delta \varphi_y(n)$ 与 $\Delta \varphi_z(n)$ 分别对应结构体形式 IMU_Report 中所定义的数据成员 $gyro_x, gyro_y, gyro_z$, 表示在第 n 采样时间段内该检测点自身坐标系下的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的角度变化量为已知数据。此后使用该数理方法倒推, 即可解出待求的 $\Delta y(n), \Delta p(n)$ 与 $\Delta r(n)$ 。

根据思想“检测点在自身坐标系下的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的角度变化量可分拆成由其静态欧拉角描述下的 3 个欧拉角的角度变化量所引起的其在自身坐标系下 X 轴、 Y 轴、 Z 轴角度的变化分量的和”, 列出以下方程:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \Delta \varphi_x(n) \\ \hat{e}_0^0 \Delta \varphi_y(n) \\ \hat{e}_0^0 \Delta \varphi_z(n) \end{pmatrix} \dot{u} = M_x(n) \cdot M_y(n) \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \end{pmatrix} \dot{u} + \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \end{pmatrix} \Delta y(n) \dot{u} + M_y(n) \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \end{pmatrix} \dot{u} + \begin{pmatrix} \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \\ \hat{e}_0^0 \end{pmatrix} \Delta r(n) \dot{u}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \hat{e}_x^1 & 0 & 0 & \dot{\psi} \\ \hat{e}_y^0 & \cos roll(n) & \sin roll(n) & \dot{\psi} \\ \hat{e}_z^0 & -\sin roll(n) & \cos roll(n) & \dot{\psi} \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \hat{e}_x^0 \cos pitch(n) & 0 & -\sin pitch(n) & \dot{\psi} \\ \hat{e}_y^0 & 0 & 1 & \dot{\psi} \\ \hat{e}_z^0 \sin pitch(n) & 0 & \cos pitch(n) & \dot{\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_x^1 \\ \hat{e}_y^0 \\ \hat{e}_z^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y(n) \\ \Delta p(n) \\ \Delta r(n) \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \hat{e}_x^1 & 0 & 0 & \dot{\psi} \\ \hat{e}_y^0 & \cos roll(n) & \sin roll(n) & \dot{\psi} \\ \hat{e}_z^0 & -\sin roll(n) & \cos roll(n) & \dot{\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_x^0 \\ \hat{e}_y^0 \\ \hat{e}_z^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p(n) \\ \Delta r(n) \\ \Delta r(n) \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \hat{e}_x^1 \\ \hat{e}_y^0 \\ \hat{e}_z^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta r(n) \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3)
\end{aligned}$$

其中, $\Delta y(n)$ 、 $\Delta p(n)$ 与 $\Delta r(n)$ 分别表示该检测点在第 n 采样时间段内, 其静态欧拉角所产生的角度变化量。式(3) 等号右侧所出现的 3 个列向量 $[\Delta y(n), 0, 0]^T$ 、 $[0, \Delta p(n), 0]^T$ 与 $[0, 0, \Delta r(n)]^T$, 分别使用矩阵语言, 对上述 3 个静态欧拉角变化量 $\Delta y(n)$ 、 $\Delta p(n)$ 与 $\Delta r(n)$ 进行等效描述。 $M_z(n)$ 、 $M_y(n)$ 、 $M_x(n)$ 分别描述了如何从归一化坐标系得到 IMU 坐标系的 3 个旋转变换步骤—绕 z 轴逆时针旋转 yaw 角、绕 y 轴逆时针旋转 $pitch$ 角与绕 x 轴逆时针旋转 $roll$ 角。式(3) 等号左侧的列向量 $[\Delta \varphi_x(n), \Delta \varphi_y(n), \Delta \varphi_z(n)]^T$ 是使用矩阵语言描述在第 n 采样时间段内, 检测点的角速度信息。式(3) 等号右侧和式(3) 的第一、第二、以及第三加项分别表示了该检测点静态欧拉角描述下的 3 个角度变化量所引起的其在自身坐标系衡量下的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的角度变化分量。

由于 IMU 存在零点漂移现象, 借助此方法测得的数据所具有的误差大小会随着累积次数 n 的增加而变大。即使用此方法所测得的数据, 在模块运行时间过长时, 会产生不可靠因素。

2.3.3 算法子过程 S3 - 3

算法子过程 S3 - 3(数据融合子过程) 通过采用加权求平均的方法(权值由实验或经验确定), 来对算法子过程 S3 - 1 与 S3 - 2 中所得到的 2 套不同的关于静态欧拉角的数据, 进行融合, 得到一套具有较强可靠性的对于检测点静态欧拉角的描述。

2.3.4 算法子过程 S3 - 4

算法子过程 S3 - 4(坐标系归一化子过程) 使用 S3 - 3 中经过数据融合后得到的关于检测点的静态欧拉角描述, 得到对于该检测点的旋转矩阵描述方式, 并通过其逆矩阵来对结构体形式 IMU_Report 的某个实例中的各个数据成员完成第二次校准工

作, 即各检测点坐标系的归一化。

关于检测点在第 n 采样时间段内所适用的旋转矩阵描述由下述公式计算得出:

$$M_x(n) = \begin{bmatrix} \hat{e}_x^1 & 0 & 0 & \dot{\psi} \\ \hat{e}_y^0 & \cos roll(n) & \sin roll(n) & \dot{\psi} \\ \hat{e}_z^0 & -\sin roll(n) & \cos roll(n) & \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M_y(n) = \begin{bmatrix} \hat{e}_x^0 \cos pitch(n) & 0 & -\sin pitch(n) & \dot{\psi} \\ \hat{e}_y^0 & 0 & 1 & \dot{\psi} \\ \hat{e}_z^0 \sin pitch(n) & 0 & \cos pitch(n) & \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_z(n) = \begin{bmatrix} \hat{e}_x^0 \cos yaw(n) & \sin yaw(n) & 0 & \dot{\psi} \\ \hat{e}_y^0 - \sin yaw(n) & \cos yaw(n) & 0 & \dot{\psi} \\ \hat{e}_z^0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M(n) = M_x(n) \cdot M_y(n) \cdot M_z(n) \quad (7)$$

其中, $yaw(n)$ 、 $pitch(n)$ 与 $roll(n)$ 分别表示该检测点在第 n 采样时间段内所适用的静态欧拉角描述。 $M_x(n)$ 、 $M_y(n)$ 、 $M_z(n)$ 分别描述了如何从归一化坐标系得到 IMU 坐标系的在第 n 采样时间段内所适用的 3 个旋转变换步骤—绕 z 轴(将归一化坐标系)逆时针旋转 $yaw(n)$ 角、绕 y 轴逆时针旋转 $pitch(n)$ 角与绕 x 轴逆时针旋转 $roll(n)$ 角。由式(7) 即可计算得到在第 n 采样时间段内所适用的旋转矩阵, 即 $M(n)$ 。

2.4 算法过程 S4

算法过程 S4(应用坐标系归一化后传感器数据, 进行手势模式识别的过程) 利用经过 S3 第二次校正后所得到的结构体中的各个数据成员, 通过综合使用 2 套本文所创新性开发的软件检测机制(加速度维持软件检测机制与角度维持软件检测机制), 可以构建出多种可识别手势标志点运动模式, 其中每一个手势均由一个具体的隶属于 S4 的手势检测与数据转换算法子过程负责标志点运动模式识别, 以及对于 HID 数据帧暂储区内的相应字段的改写工作。此处所提及的 HID 数据帧, 可用于控制位于被控设备屏幕中鼠标光标的动作。一个 HID 数据帧内包含有许多具有不同含义的字段, 本文从中选用了 4 个构造了一个结构体形式 HID_Report。该结构体的具体定义细节参见表 2。

对于加速度维持软件检测机制, 利用 S3 第二次校正后所得到的数据 acc_x 、 acc_y 与 acc_z , 构造该检测点的加速度矢量 $[acc_x, acc_y, acc_z]^T$ 。再通过将该矢量的模长与一个事先所给定的期望模长 a_{expect} 进行比较。当该矢量的模长不小于期望模长 a_{expect} 的时间(即加速度维持时间 T_{acc}) 达到一个

事先所给定的时间阈值时,检测点在此刻通过了加速度维持软件检测机制的检测,并立即对加速度维持时间 T_{acc} 进行置零操作。

表2 结构体形式 HID_Report 数据成员定义

Table 2 The definition of data member from structure form HID_Report

数据成员	变量类型	变量定义
button	uint8_t	低第一,二或三位二进制位的 0/1 取值分别指示鼠标指针在下次状态更新时执行左键、右键、中键松开或中键按下操作,其余位保留
x_control	int8_t	鼠标指针在下次状态更新时在屏幕坐标系中基于其所位于的旧位置,沿着 x 轴正方向位移多少个像素点
y_control	int8_t	鼠标指针在下次状态更新时在屏幕坐标系中基于其所位于的旧位置,沿着 y 轴正方向位移多少个像素点
wheel_control	int8_t	指示鼠标指针在下次状态更新时其滚轮的滚动量

对于角度维持软件检测机制,是利用固定于拇指与食指之上的两检测点,得出有关检测点的两加速度矢量。而后便可计算出两者的夹角 θ 。通过使用该夹角 θ 与一个夹角区间 U 进行比较,当夹角 θ 落于该夹角区间 U 中的角度维持时间 T_{Ang} 达到一个

事先所给定的时间阈值时,即判定现装置所处状态通过了期望夹角为 θ_{expect} 的角度维持软件检测机制的检测,并在此后立即对角度维持时间 T_{Ang} 进行置零操作。研究推得的计算公式如下:

$$U: (\theta_{expect} - r, \theta_{expect} + r) \quad (8)$$

2.5 算法过程 S5

算法过程 S5(HID 数据帧生成与发送过程)通过使用经过算法过程 S4 的各个手势检测与数据转换算法子过程修改过的结构体(结构体形式 HID_Report 的一个实例)中所存数据,按其字段含义对 HID 数据帧暂储区中的对应数据单元进行覆写,以生成待传送的 HID 数据帧。此后借助主控的 I/O 接口将相应的 HID 数据帧通过使用 USB 协议将其传送给被控设备。

3 性能测试

对于本文技术基础—手势识别而言,是借助本文创新性构建的 2 套软件检测机制,通过借助佩戴于用户手指上的 2 个 IMU,来捕获用户的某种预设手指运动模式实现的。对于需要捕获的手势运动模式,其设计构建符合如下原则:动作简便,自然;手势运动特征明显,易于捕捉^[4-5]。基于以上要求,本文设计了以下 4 种手势,能够更好测试本方案的性能。对于各手势的细节详见图 7。

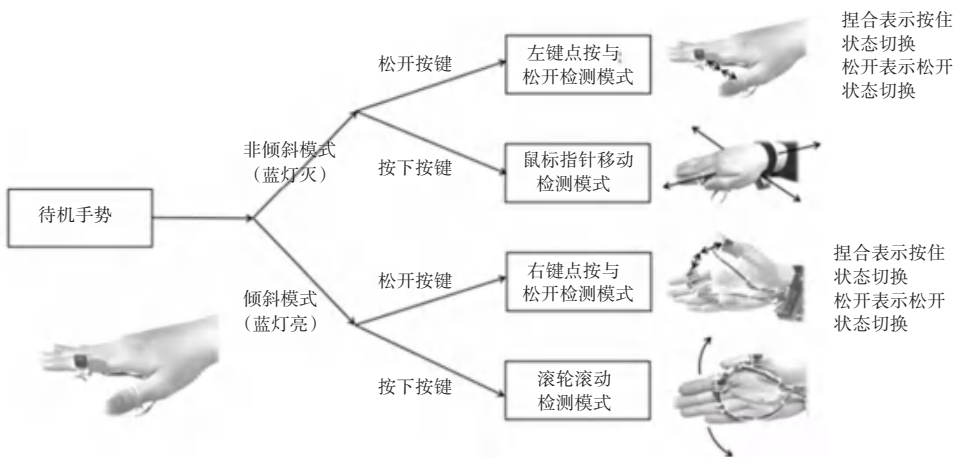


图7 4种测试手势模式转换与手势定义内涵展示

Fig. 7 Four test gesture mode conversion and gesture definition meaning display diagram

需要注意的是,图7中倾斜模式与非倾斜模式代表手掌是否水平于地面。而鼠标左或右键转换为点按与松开状态的切换条件为:用于食指拇指是否处于捏合状态。

性能测试实验数据如图8~11所示。经实验数据分析得出,本文经测试后所采用的最佳硬件实例

平台上所运行的 AR 设备手势交互实现方案的手势识别平均时间约为 759.37 ms;手势识别平均正确率约为 95.68%;软件理论刷新率(表示主函数的运行速率,表征传感器采样速率与手势识别理论检测速率)约为 2 000.17 ms;佩戴在用户身上的辅助装置质量约为 60 g。此外,辅助装置整体处于怠速运

行状态(主要装置关)时,平均功耗约为 0.22 W;辅助装置上 2.4 GHz 数据收发模块处于怠速运行状态(主要装置开,不做手势)时,平均功耗约为 0.23 W;辅助装置整体处于全速运行状态(主要装置开,频繁做手势)时,平均功耗约为 0.26 W。

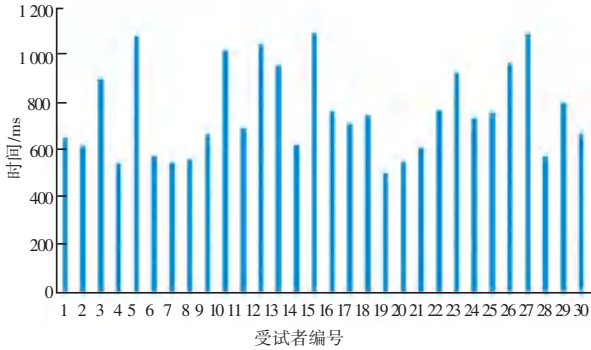


图 8 对于不同受试者的手势平均响应时间柱状图

Fig. 8 For different test participants, the histogram of the gesture average response time

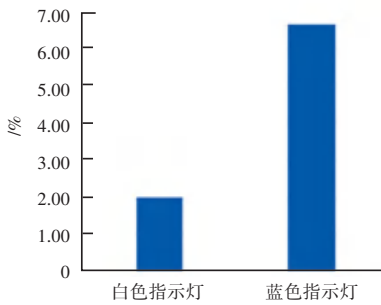


图 9 手势识别错误率柱状图

Fig. 9 Histogram of gesture recognition error rate

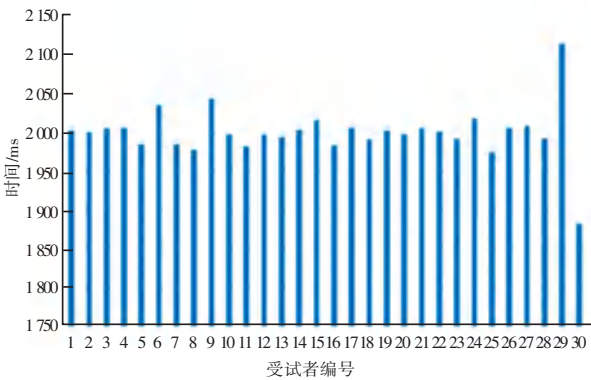


图 10 主函数运行 500 次所用时间柱状图

Fig. 10 Histogram of the time taken for the main function to run 500 times

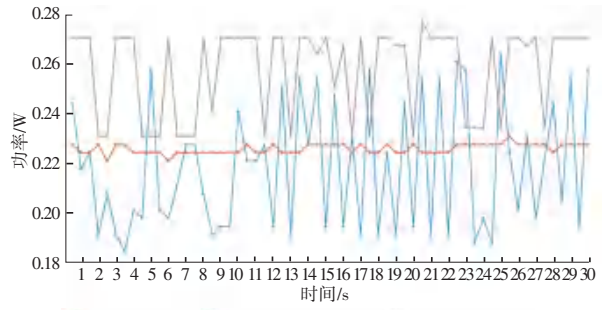


图 11 辅助装置功率随时间变化折线图

Fig. 11 Supported device power change line chart over time

4 结束语

本文创新性地提出了一种 AR 设备手势交互实现方案。应用 2 个佩戴在用户食指与拇指之上的微惯性传感器,主动测量出两手指标志点的各个运动信息,接着将使用这些数据,解算出相应的检测点在某一相对固定的归一化坐标系下的空间位置;并结合基于本文提出的 2 套检测机制所构建的多种可识别标志点运动模式,用于实现手势的识别工作。最后,将相应的识别结果在用户的 AR 显示器中予以即刻反馈,进而实现手势交互功能。经过性能测试指出,对比现有理论与技术,运行于本文所提出的硬件实例方案上的 AR 设备手势交互实现方案在手势识别正确率、设备质量以及功耗上具有一定优势。

参考文献

- [1] 方凌智,沈煌南. 技术和文明的变迁—元宇宙的概念研究[J]. 产业经济评论, 2022, 48(1): 5-19.
- [2] 张维,林泽一,程坚,等. 动态手势理解与交互综述[J]. 软件学报, 2021, 32(10): 3051-3067.
- [3] 张风军,戴国忠,彭晓兰. 虚拟现实的人机交互综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(12): 1711-1736.
- [4] 肖茜,杨平,徐立波. 一种基于 MEMS 惯性传感器的手势识别方法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(5): 611-615.
- [5] 陈意,杨平,陈旭光. 一种基于加速度特征提取的手势识别方法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(8): 1073-1078.
- [6] 张平,刘祚时. 基于惯性传感器 MPU6050 的手势识别方法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(1): 46-49,53.
- [7] 刘蓉,刘明. 基于三轴加速度传感器的手势识别[J]. 计算机工程, 2011, 37(24): 141-143.
- [8] 仇立杰,彭四伟. 基于 MEMS 传感器的三维空间运动轨迹提取方法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(9): 292-295.