

# 基于 Noitom 数据手套的船舶航行仿真交互方法研究

徐仁桐<sup>1,2,3</sup>, 黄天<sup>1,2</sup>, 李酬<sup>1,2</sup>, 张盈彬<sup>1,2</sup>, 杨治锋<sup>1,2</sup>, 赵宇宇<sup>1,2</sup>

(1. 上海船舶工艺研究所, 上海 200032; 2. 船舶智能制造国家工程研究中心, 上海 200032;  
3. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150009)

**摘要:** 研究实现了基于 Unity 引擎的船舶航行虚拟仿真, 并构建了虚拟手模型, 通过数据手套和方位跟踪器驱动虚拟手模型, 获得人手空间坐标数据, 并将其转换为虚拟手模型的虚拟坐标数据; 通过不同的虚拟手势控制船舶的虚拟航行过程, 包括进退、转向和 UI 射线交互; 进行了 6 种静态手势的交互实验, 并通过误差标定和卡尔曼滤波算法增强数据稳定性; 实验结果表明, 6 种手势的平均识别成功率为 97%; 影响手势识别准确性的因素包括手势复杂度、传感器误差、VR 设备基站位置、遮挡效应及外部干扰等; 实验验证了基于 Noitom 数据手套的船舶航行仿真交互的可行性和有效性, 提供了提升人机交互效率和便捷性的技术支持。

**关键词:** 惯性传感器; 手势识别 (HGR); 人机交互 (HCI); 智能可穿戴设备; 静态手势; 卡尔曼滤波算法

## Research on Ship Navigation Simulation Interactive Method Based on Noitom Data Gloves

XU Rentong<sup>1,2,3</sup>, HUANG Tian<sup>1,2</sup>, LI Chou<sup>1,2</sup>, ZHANG Yingbin<sup>1,2</sup>, YANG Zhiduo<sup>1,2</sup>, ZHAO Yuyu<sup>1,2</sup>

(1. Shipbuilding Technology Research Institute, Shanghai 200032, China;

2. National Engineering Research Center of Ship Intelligent Manufacturing, Shanghai 200032, China;

3. School of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150009, China)

**Abstract:** Based on the Unity engine, a ship navigation virtual simulation is presented, which constructs a virtual hand model driven by a data glove and orientation tracker. The spatial coordinates of the human hand are obtained and converted into the virtual coordinates of the virtual hand model. Different hand gestures are used to control the ship's virtual navigation, including its forward, backward, steering, and interactions of UI rays. Interaction experiments with six types of static hand gestures are conducted, and the error calibration and Kalman filtering algorithm are used to enhance data stability. Experimental results showed that the average recognition success rate for six gestures is 97%. The accuracy of hand gesture recognition (HGC) is affected by gesture complexity, sensor errors, base station location of VR device, occlusion effects, and external interference. The experiments validate the feasibility and effectiveness of the ship navigation simulation interaction based on the Noitom data gloves, providing a technical support for improving the efficiency and convenience of human-machine interaction (HCI).

**Keywords:** inertial sensors; HGR; HCI; intelligent wearable devices; static gestures; Kalman filter algorithm

## 0 引言

随着虚拟现实 (VR)、增强现实 (AR) 和沉浸式技术的快速发展, 基于这些技术的船舶仿真系统在船舶设计、训练和航行等领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。在传统的船舶仿真系统中, 用户通常使用鼠标、键盘或触摸屏等输入设备进行交互, 这些方式虽然成熟, 但存在操作不

够直观、限制用户活动自由度等固有缺陷<sup>[2]</sup>。近年来, 手势交互技术为解决传统交互方式的不足提供了新的思路, 其中基于数据手套的解决方案因其独特优势受到广泛关注<sup>[3]</sup>。

人手作为人体最灵活的部位之一, 存在二十多个关节节点, 并且平均每 1 cm<sup>2</sup> 就含有两百多个感受器<sup>[4-5]</sup>。在船舶仿真环境中, 手势交互能够提供更加自然、直观

收稿日期:2025-05-06; 修回日期:2025-06-04。

作者简介:徐仁桐(1989-),男,博士,高级工程师。

引用格式:徐仁桐,黄天,李酬,等.基于 Noitom 数据手套的船舶航行仿真交互方法研究[J].计算机测量与控制,2026,34(4):272-278.

的操作体验,使用户可以在任意姿态下高效地发出指令。当前主流的手势识别技术可分为佩戴式和非佩戴式两大类,具体包括基于触摸屏、惯性传感器、红外距离传感器、视觉识别以及数据手套等技术路线<sup>[6]</sup>。其中,基于视觉的手势识别技术虽然发展较早,但其识别精度易受环境光线、摄像头角度等因素影响;而基于传统输入设备的方法则缺乏操作的自然性和沉浸感<sup>[7]</sup>。

相比之下,基于传感器的手势识别技术不受环境光和背景色的影响,数据采集稳定,信号处理简单,且克服了视觉识别技术的缺点<sup>[8-9]</sup>。此外,惯性传感器技术还具备微型化、智能化、高集成度、低功耗等优势,提供了更加稳定可靠的交互方式,尤其适合在复杂环境中应用<sup>[10]</sup>。近年来微机电系统(MEMS)技术的进步推动了传感器向小型化、高精度、高可靠性、低成本方向发展,采用惯性测量单元制作数据手套成为了主要选择之一。2017年,赵裕沛采用11个9轴惯性测量单元设计了一款面向手部康复的数据手套<sup>[10]</sup>,可以便捷地采集手部各重要关节的数据,经过校正融合后得到手部的姿态数据。刘续丹等人<sup>[11]</sup>基于弯曲度传感器和MPU6050结合卡尔曼滤波设计了一款数据手套,并与VR眼镜结合实现了虚拟交互功能。

现有的船舶仿真系统中,传统的输入设备和手势识别技术已经难以满足精细化、复杂化的操作需求。因此,本研究通过采用基于传感器的手势识别技术,特别是数据手套,旨在提升船舶仿真系统的交互性和直观性。研究的核心目标是验证数据手套在船舶航行仿真中的应用效果,探索如何提升手指关节数据的准确率,并考察数据手套交互的成功率。与基于摄像头的视觉手势识别系统相比,数据手套不仅在精度、稳定性上有较大提升,而且能够适应多种复杂的使用环境,不受光照和背景色变化的影响<sup>[12-13]</sup>。

因此,本研究不仅在技术创新上具有一定价值,也为船舶仿真系统的进一步发展提供了新思路。通过改进交互方式,提升用户的操作体验,进一步推动船舶仿真技术的普及与发展。

## 1 手势识别系统设计

### 1.1 手势识别框架结构设计

手势识别框架是一个高度集成且多层次的系统,它始于硬件数据采集层,通过各类传感器捕捉手势的原始运动信号,并借助无线传输技术将这些信号发送至数据处理中心。随后,数据预处理层对这些信号进行去噪、标准化和手势段分割等处理,为后续的识别工作奠定坚实基础。特征提取层则针对静态和动态手势提取关键特征,这些特征能够准确反映手势的特性和差异<sup>[14-15]</sup>。

手势分类与识别层作为框架的核心,利用分类算法

对提取的特征进行精准分类和识别,从而输出手势的语义信息。最终,在应用层,手势识别的结果被转化为为用户可理解的信息或操作指令,实现与用户的自然、便捷交互。

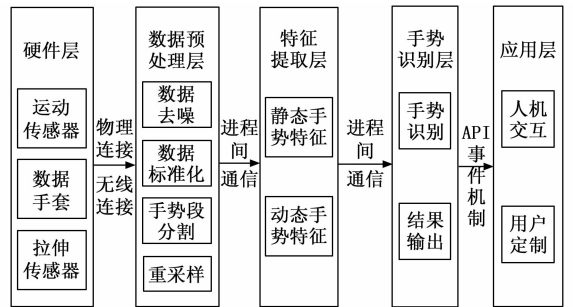


图 1 手势识别框架

### 1.2 人手的结构分析

人手部共有 27 块骨头,这些骨头被分为腕骨、掌骨和指骨三类。指骨共有 14 块,分布于手指上,包括近节指骨、中节指骨和远节指骨,大拇指只有近节指骨和远节指骨,其他 4 根手指各有 3 块指骨<sup>[16-17]</sup>。骨节间由关节连接,人手部的关节主要包括桡腕关节、腕骨间关节、腕掌关节、掌骨间关节、掌指关节和指骨间关节等。其中掌指关节(MPJ)连接掌骨与指骨;大拇指的指间关节(IPJ)连接近节指骨与远节指骨;其余 4 根手指的指骨之间分别由近指关节(PIPJ)、远指关节(DIPJ)连接。人手的骨骼和关节结构如图 2 所示。

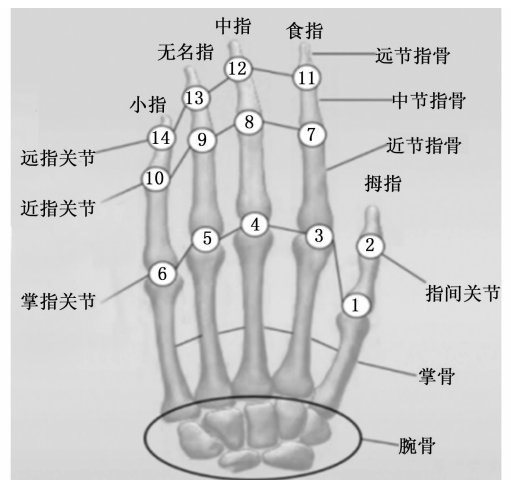


图 2 人手骨骼与关节结构

从实际人手到虚拟手的运动映射方法主要分为点对点映射和关节到关节映射两种<sup>[18]</sup>。点对点映射是最直接的映射方法之一,它将人手的指尖位置直接映射到虚拟手的指尖位置。这种方法通常应用于人手二指夹取物体时的场景。关节到关节映射方法考虑了人手和虚拟手关节之间的对应关系。这种方法通常需要对人手和虚拟手的关节进行运动学分析,以建立它们之间的映射关

系<sup>[19-20]</sup>。本文采用便于控制的关节到关节映射。为了便于进行运动分析,将人手骨骼结构简化为连杆结构,简化后的手部结构只需要得到 14 个关节的弯曲角度就能得到各手指的姿态,这 14 个关节弯曲角度的范围如表 1 所示。

表 1 手关节弯曲角度范围

手指	关节	角度范围/(°)
拇指	掌指关节	0~60
	指尖关节	0~90
食指	掌指关节	0~80
	近指关节	0~110
	远指关节	0~90
中指	掌指关节	0~90
	近指关节	0~110
	远指关节	0~100
无名指	掌指关节	0~90
	近指关节	0~100
	远指关节	0~70
小指	掌指关节	0~90
	近指关节	0~100
	远指关节	0~70

### 1.3 手势定义和手势库设计

在基于数据交互手套的手势识别技术中,手势的定义是一个核心环节。手势通常被理解为具有特定含义的手或手臂的运动,这些运动可以传递信息或指令,用于人机交互。

手势可以分为静态手势和动态手势。静态手势指的是单个手势或者手型,表现为在空间中的静止状态;而动态手势则指的是一系列的手势动作和运动,表现为在空间中的运动轨迹。

为了对手势进行准确地识别,首先需要对手势进行明确的定义。这通常包括确定手势的起始和结束状态、手势的运动轨迹、速度、加速度等特征。在定义手势时,需要遵循一些原则,如被定义的手势能够被用户准确地记忆和执行,以确保手势识别的准确性和可靠性。

由此本文根据拉伸传感器和运动传感器的特性,设计了包含多种静态和动态手势的手势库。如图 3 所示,其中带序号的是本文实验所用到的手势。

### 1.4 数据采集、处理与识别

数据手套的输出数据包括:传感器姿态四元数 Sensor-Quat、传感器角速度 Sensor-Gyro、传感器加速度 Sensor-Acce、关节速度 Joint-Velo、关节位置 Joint-Posi。

在数据手套的硬件系统中,传感器收集的数据通过配置的蓝牙模块传输到主机计算机系统。数据以特定格式发送,数据项包括分为 4 段,段之间用一连接。第一段为身体部分名称;第二段为特征信息,包括传感器、关节、骨骼共 3 种;第三段为物理量信息,包括姿态四

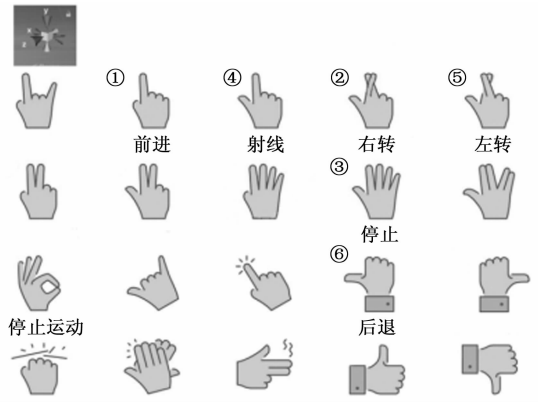


图 3 手势库

元数、角速度、加速度、速度、位置共 5 种;第四段为具体分量数值,包括  $x, y, z$  分量,其中四元数多一个  $w$  分量。在数据中,由上文中的第二段和第三段一共组合成了 6 种不同的数据进行输出,包括:传感器姿态四元数、传感器角速度、传感器加速度、关节速度、关节位置、骨骼姿态四元数。帧序号,从 0 开始记数,丢包标记 Lost,取值 1 代表丢包,数据值通过算法得到。取值 0 代表正常,数据值为传感器测量值。

数据手套可以在载体没有平移运动的情况下,通过加速度感知重力分量,计算出载体的俯仰和横滚;磁力计可以感知磁北方向,因此可以计算载体的磁北航向;而陀螺仪测量输出载体的旋转角速度,通过积分可以计算得到横滚、俯仰、航向增量。但由于陀螺输出值含有误差,采用积分计算,误差会随着时间累积。所以可以采用加速度计和磁力计的即时输出值对陀螺进行修正,达到优势互补的效果,提高测量精度和系统的动态性能。

计算机系统接收到数据手套传输的数据后,会进行进一步的处理和分析。根据接收到的手部动作数据,计算机可以推断出手的位置、手指的姿势和手势等信息。由于传感器在采集数据时可能会受到噪声或干扰的影响,因此需要对数据进行滤波和平滑处理。这可以通过卡尔曼滤波器算法来实现,以提高数据的准确性和稳定性。卡尔曼滤波器通过结合前一个时刻的状态估计和当前测量数据,来不断更新状态估计。将手指的弯曲角度或弯曲量视为系统的状态变量,而传感器的测量值是对该状态的观测。卡尔曼滤波算法处理流程如图 4 所示。

在时间步  $k$ ,卡尔曼滤波器会根据前一个状态估计和控制输入预测当前的状态:

$$\hat{x}_k = \mathbf{A}\hat{x}_{k-1} + \mathbf{B}u_k \quad (1)$$

其中: $\hat{x}_k$  是预测的状态(即当前时刻的估计状态)。 $\mathbf{A}$  是状态转移矩阵,表示从上一个时刻到当前时刻的状态变化。 $\mathbf{B}$  是控制输入矩阵,表示控制输入如何影响状态。 $u_k$  是控制输入。

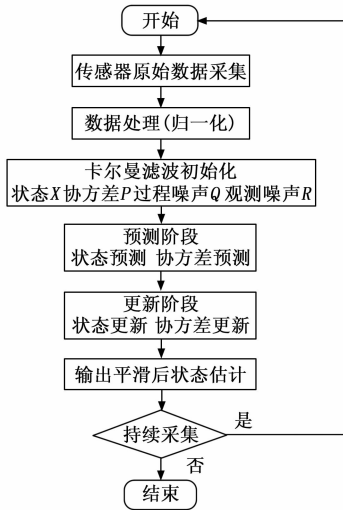


图 4 卡尔曼滤波算法流程图

预测的误差协方差为:

$$P_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2)$$

其中:  $Q$  是过程噪声协方差矩阵。

当新的观测值  $z_k$  到来时, 卡尔曼滤波器根据预测的状态更新当前的估计:

$$K_k = P_k H^T (HP_k H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

其中:  $H$  是观测矩阵, 表示如何从状态空间映射到观测空间。 $R$  是观测噪声协方差矩阵。更新估计的状态:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k(z_k - H\hat{x}_k) \quad (4)$$

更新误差协方差:

$$P_k = (I - K_k H)P_k \quad (5)$$

此外, 数据手套在长时间使用或受到外部因素影响时, 可能会出现一定的漂移或误差。因此, 需要对数据进行校准, 以消除这些误差并提高数据的准确性。校准过程通常涉及使用标准动作或设备来对比和修正数据手套的输出。

将传感器数据实时传输到 Unity 进行预处理、特征提取和分类。通过 C# 脚本自定义手势和手势反馈结果, 例如伸出食指, 其余手指紧握则输出前进, 具体流程如图 5 所示。

## 2 Unity3D 中的船舶仿真系统设计

### 2.1 船舶仿真系统架构设计

船舶仿真系统的架构可以分为多个模块, 确保系统的高效性、可扩展性和易维护性。一个典型的系统架构设计包括仿真引擎模块、用户交互模块、数据处理与识别模块、渲染与显示模块、系统通信模块、硬件支持与接口模块等几个核心部分, 船舶仿真系统架构如图 6 所示。

仿真引擎模块是船体仿真系统的核心, 负责模拟船体的物理行为、运动和环境交互。该模块需要实现船体运动的物理建模以及船体与外部环境的相互作用; 用户交互模块负责与用户的交互, 尤其是通过数据手套、手

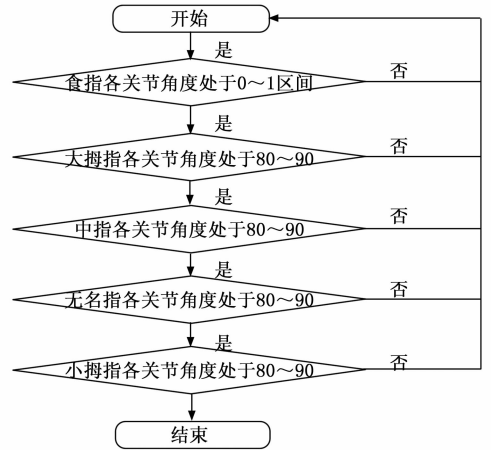


图 5 手势识别流程图

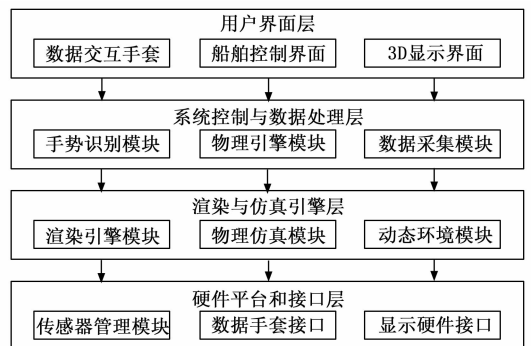


图 6 船舶仿真系统架构图

势识别系统进行的交互。此模块的目标是实现用户与虚拟船体之间的无缝交互, 用户通过自然的手势或操作来控制仿真; 数据处理与识别模块处理来自数据手套或其他传感器的输入数据, 并将其转化为仿真系统可以识别和处理的指令。这一模块的关键任务是手势识别算法的优化和实时处理, 确保用户的动作被及时、准确地反映到仿真系统中; 渲染与显示模块负责将船体模型及其在虚拟环境中的行为可视化; 系统通信模块用于不同模块之间的数据传输与通信。该模块确保了各个子系统的实时同步, 支持不同设备(如手套、传感器、计算机等)之间的有效通信; 硬件支持与接口模块负责硬件设备的管理, 包括数据手套、传感器、显示设备、控制面板等外设的连接、数据传输与同步。

### 2.2 Unity3D 虚拟场景搭建

船舶仿真系统基于 Unity3D 虚拟场景搭建的关键在于创建一个能够准确模拟船舶航行过程的真实环境。这一过程的核心是利用 Unity3D 的强大图形引擎与物理引擎来构建一个既美观又逼真的虚拟场景。场景主要包括海洋、船舶、天气系统、海洋物理、海况等。海洋是模拟中最关键的部分, 需要考虑到波浪的生成与变化, 通过 Unity 的水体插件, 或者使用 Shader 来实现不同类型的海面效果, 如平静的海面、风浪起伏的海面等。海

洋的动态表现直接影响船舶的航行体验，因此在设计时不仅要考虑到水面的视觉效果，还要加入物理仿真，使得船舶在水面上的漂浮、摇晃以及与波浪的互动都能真实展现。

在仿真过程中，船舶的运动并非仅仅依赖于模型的移动，而是通过控制系统来模拟航行的物理行为，包括推进力、转向力以及水流的影响。通过船舶的控制算法，使得船舶能够响应用户的输入，模拟真实的航行过程。

在船舶与环境的交互上，船舶的动力系统和物理引擎起着至关重要的作用。通过 Unity3D 的物理引擎计算船舶的质量、惯性、浮力等特性来模拟船舶在海洋中的运动。同时，船舶的推进器、舵和航向控制系统的设计，使得船舶能够在虚拟环境中响应用户或实验操控。通过精确的动力学算法，船舶能够根据舵角和推进力的变化做出相应的航行姿态，表现出转弯、加速、减速等动态效果。船舶的回转试验效果如图 7 所示。



图 7 船舶回转试验效果图

### 2.3 基于数据手套的交互方式设计

基于数据手套的交互方式设计，首先要考虑手套与虚拟环境的精准同步。将传感器数据转化为虚拟环境中的交互指令，确保手部动作和虚拟船舶控制的高效配合。手势识别不仅能够通过简单的手部动作完成基本的控制任务，还能通过更加复杂的手势组合来触发多种操作。例如，用户可以通过伸出手指模拟船舶的起航操作，或者通过调节手指的弯曲角度来调节船舶的速度。通过精确的手势控制，用户可以直接与虚拟船舶进行细致的互动，无需依赖鼠标、键盘等传统输入设备，从而提高操作的便捷性和直观性。

本文的虚拟场景设计，由 3 个基本组件组成：虚拟场景模块，创建虚拟手用于同步人手的动作，创建运行

场景，由虚拟手控制场景物体的运行；通信模块，用于接收来自数据手套的手部信息数据；GUI 界面，用于显示手指关节的弯曲角度。Unity3D 中虚拟手和人手的同步如图 8 所示，分别对应控制船舶的前进、后退、左转、右转、停止以及发射射线。

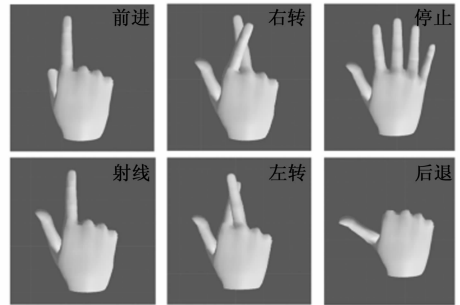


图 8 Unity3D 中虚拟手和人手的同步

## 3 实验和结果分析

### 3.1 实验目的与内容

本实验主要是验证数据手套交互在船舶仿真领域的可行性。首先对比卡尔曼滤波前后的关节数据，验证卡尔曼滤波是否提高数据的准确性，其次，选择多位参与者，实验中，参与者佩戴数据手套执行多种手势，通过手势识别操控船舶仿真系统，系统将实时记录每个手势的识别成功率及错误类型。实验通过统计分析手势的识别准确度，评估数据手套在手势识别过程中的表现，检验其可行性。

### 3.2 各手指的弯曲数据

本实验测试了戴上数据手套，手掌从放平到握拳过程的各项传感器数据随时间的变化，本文数据手套的输出数据包括：传感器角速度 Sensor-Gyro、传感器加速度 Sensor-Acce、关节位置 Joint-Posi。

其中 5 个手指的远端指关节传感器角速度、加速度、关节位置（即角度）随时间的变化曲线如图 9 所示（图中从左往右分别是大拇指、食指、中指、无名指、小拇指）。

以食指为例，远端关节角度的原始数据、卡尔曼滤波处理数据、实际数据的对比如图 10 所示。

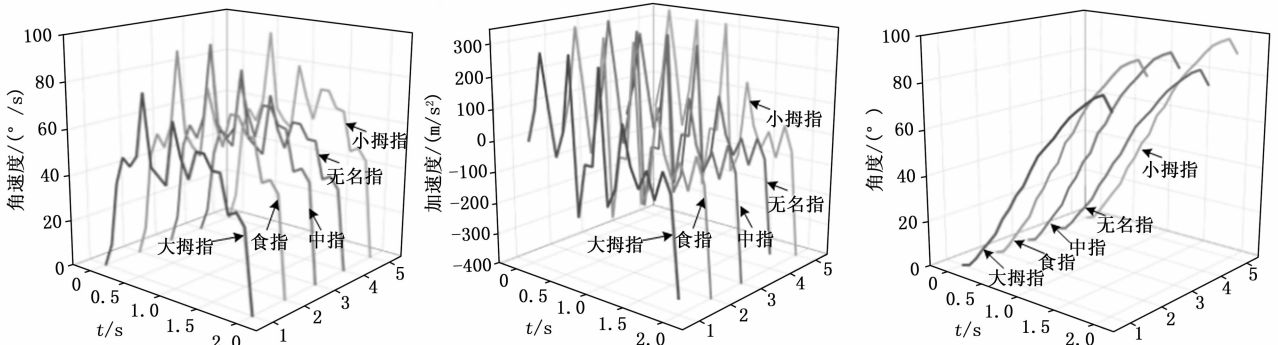


图 9 五指远端指关节传感器数据随时间变化曲线

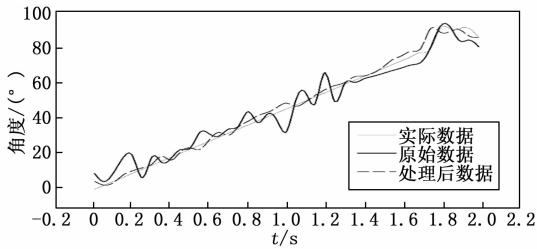


图10 处理前后关节角度对比

由图10可得,卡尔曼滤波通过有效去除噪声,显著改善了角度数据的平滑性和准确性。与原始带噪声的数据相比,滤波后的数据更加稳定,并且与实际角度数据的差异较小,表明卡尔曼滤波能够成功估计真实信号,特别适用于需要实时去噪和精确估计的应用场景。

### 3.3 虚拟手的同步率分析

本文针对手势的同步率展开研究,试验了3.3章节的6个静态手势,多次试验记录各个手势的同步数,由于传感器必定存在误差,虚拟手的姿势与实际姿势存在一定偏差,故本文认定虚拟手可以触发手势相对应的事件,即判定虚拟手同步成功。为统计刚接触此系统人员的使用情况,选择非开发人员为实验参与者,对图5上的6个手势进行同步实验,每个手势试验100次,记录成功触发对应事件的次数,得到同步率数据如表2所示。

表2 手势识别的同步率

手势编号	总次数	成功次数	成功率/%
1	100	98	98
2	100	92	92
3	100	100	100
4	100	97	97
5	100	94	94
6	100	100	100

对表2分析,我们可以清楚地发现不同手势的成功率呈现极端现象,有些手势可以达到百分百的成功率,但有些手势成功率较低,主要原因是几个相近的手势出现了误判,例如手势2和手势5,两个手势较为相近,系统通过比较中指与食指的弯曲程度来判别结果,如果中指的弯曲程度大于食指那就是手势5,反之则为手势2,如果角度误差太大就容易导致误判。所以尽量选取差异性较大的手指作为指令。此外,除了传感器误差之外,VR设备的基站也会对识别产生影响,若是基站太远或是被物体遮挡,受到外界干扰等等,都会影响手势识别的准确性。

## 4 结束语

综上所述,本研究成功地将基于数据手套的手势识别应用于船舶仿真系统中,实现了用户通过简单手势对船舶仿真的有效控制,显著提升了人机交互的高效性与

便捷性。通过精心设计的实验,验证了所提方案在复杂磁环境下的稳定性和准确性,展示了其在实际应用中的巨大潜力。具体而言,利用惯性传感器全面捕捉了5个手指及手腕关节的多种信息,包括姿态四元数、角速度、加速度、关节速度和位置,这些信息为手势识别提供了丰富的数据基础。通过预设的6种静态手势,实现对船舶仿真的精准控制。实验结果表明,尽管各手势识别成功率存在差异,但总体识别率高达97%,这充分证明了所提方案的可行性和有效性。

本研究也发现了一些需要改进的地方。例如,动作相近、特征模糊的手势易受误差影响,导致同步率较低。此外,传感器误差及VR设备基站的位置、遮挡和外部干扰等因素也可能对识别准确性产生负面影响。因此,在未来的研究中,需要进一步优化算法,提高手势特征的提取和识别能力,并加强对VR设备的调试和维护,以进一步提升手势识别的准确性和稳定性。

本研究为基于数据手套的船舶仿真交互提供了有力的支持,为人机交互领域的发展注入了新的活力。期待在未来的研究中,能够不断探索和创新,为人机交互领域带来更多惊喜和突破。

### 参考文献:

- [1] 李剑锋,张兆晶,张雷雨,等. 手部外骨骼运动相容性设计综述[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(6): 729-742.
- [2] WU J W, REN P, SONG B M, et al. Data glove-based gesture recognition using CNN-BiLSTM model with attention mechanism[J]. PloS One, 2023, 18(11): 1-22.
- [3] SHI Y X, DENG H M, GUO W L. Static gesture recognition based on hybrid convolution neural network[J]. Computer Science, 2019, 46(s1): 165-168.
- [4] LI F, FEI J. Gesture recognition algorithm based on image information fusion in virtual reality[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2019, 23(3/4): 487-497.
- [5] XU J, LIU C H, MENG Y X, et al. Gesture recognition base on wearable controller[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(7): 68-71.
- [6] GUNN T, JONES L, BRIDGE P, et al. The use of virtual reality simulation to improve technical skill in the undergraduate medical imaging student[J]. Interactive Learning Environments, 2017, 26(4): 1-8.
- [7] ARTURO J S, ALVARO Z, ANTONIO J M, et al. Selection of the best set of features for sEMG-based hand gesture recognition applying a CNN architecture[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4972-4987.
- [8] TOGIAS T, GKOURNELLOS C, ANGELAKIS P, et al. Virtual reality environment for industrial robot control and path design[J]. Procedia CIRP, 2021, 100: 133

- 138.

- [9] 熊 昆. 基于三维骨骼信息的手势识别算法研究及应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [10] 赵裕沛, 费 飞, 杨德华, 等. 面向手部康复应用的数据手套技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (10): 2415 - 2421.
- [11] 刘续丹, 侯红霞, 杨钰淇, 等. 基于数据手套的交互系统设计 [J]. 通讯世界, 2019, 26 (4): 313 - 314.
- [12] 黄培德, 王 琳, 萧 箏, 等. VR 环境下的虚拟手自然交互方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2021 (7): 268 - 271.
- [13] YANG W, WU X, ZHANG H. Workspace modeling and a nalysis for dexterous hands [J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2015, 12 (1): 1550006.
- [14] SAMAAN G H, WADIE A R, ATTIA A K, et al. Mediapipe' s landmarks with RNN for dynamic sign language recognition [J]. *Electronics*, 2022, 11 (19): 3228.
- [15] XIONG B P, CHEN W S, NIU Y X, et al. A global and local feature fused CNN architecture for the sEMG-  
(上接第 154 页)
- [7] 侯志楠, 谢志军. 无源定位技术在水面舰艇上的应用分析 [J]. 舰船电子工程, 2018, 38 (8): 61 - 65.
- [8] DEAK G, CURRAN K, CONDELL J. A survey of active and passive indoor localisation systems [J]. *Computer Communications*, 2012, 35 (16): 1939 - 1954.
- [9] LAOUDIAS C, MOREIRA A, KIM S, et al. A survey of enabling technologies for network localization, tracking, and navigation [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20 (4): 3607 - 3644.
- [10] 张君君. 对固定辐射源的多站无源定位研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [11] TORRIERI D J. Statistical theory of passive location systems [J]. *IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984 (2): 183 - 198.
- [12] 李立萍, 孟 静, 陈天麒. 一种排除无源交叉定位虚假交点的新方法 [J]. 系统工程与电子技术, 1999 (4): 20 - 23.
- [13] 蒋维特, 杨露菁, 杨亚桥. 测向交叉定位中基于最小距离的二次聚类算法 [J]. 火力与指挥控制, 2009, 34 (10): 25 - 28.
- [14] PANG F, DOGANÇAY K, NGUYEN N H, et al. AOA pseudolinear target motion analysis in the presence of sensor location errors [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68: 3385 - 3399.
- [15] SUN H, PAN J. A new robust multi-station direction finding cross algorithm [C] //2017 International Conference on Computer, Electronics and Communication Engineering, 2017: 209 - 215.
- based hand gesture recognition [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2023, 166: 107497.
- [16] 宋小瑛, 肖金凤, 傅舰艇, 等. 多关节灵巧手混合遥控操作控制系统 [J]. 自动化与仪表, 2016, 31 (3): 17 - 20.
- [17] 武东辉, 许 静, 陈继斌, 等. 基于融合注意力机制与 CNN-LSTM 的人体行为识别算法 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (2): 681 - 689.
- [18] YI P Z, KOLJA W. Visual-and-language multimodal fusion for sweeping robot navigation based on CNN and GRU [J]. *Journal of Organizational and End User Computing (JOEUC)*, 2024, 36 (1): 1 - 21.
- [19] KUMARI D, ANAND S R. Isolated video-based sign language recognition using a hybrid CNN-LSTM framework based on attention mechanism [J]. *Electronics*, 2024, 13 (7): 1229.
- [20] WANG Z, GAO F, ZHAO Y, et al. Improved A\* algorithm and model predictive control-based path planning and tracking framework for hexapod robots [J]. *Industrial Robot*, 2023, 50 (1): 135 - 144.
- [16] 杨思星, 郭 艳, 李 宁, 等. 基于数据融合的压缩感知多目标定位算法 [J]. 计算机科学, 2018, 45 (9): 161 - 165.
- [17] DENG F. Research on multi-platforms passive location for multi-targets [C] //2018 IEEE Aerospace Conference, IEEE, 2018: 1 - 11.
- [18] NGUYEN N H, DOGANÇAY K. Closed-form algebraic solutions for angle-of-arrival source localization with Bayesian priors [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18 (8): 3827 - 3842.
- [19] SIYI Y, JIANLIANG X, WEIGUO S, et al. Research on multi-target data association and location algorithm based on passive multi-sensor system [C] //2021 18th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), IEEE, 2021: 617 - 624.
- [20] ZHANG Y, DENG Z, GAO Y. Angle of arrival passive location algorithm based on proximal policy optimization [J]. *Electronics*, 2019, 8 (12): 1558.
- [21] ZHOU Y, SONG D, DING B, et al. Ant colony pheromone mechanism-based passive localization using UAV swarm [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14 (12): 2944.
- [22] RODRIGUEZ A, LAIO A. Clustering by fast search and find of density peaks [J]. *Science*, 2014, 344 (6191): 1492 - 1496.
- [23] 邢帅杰. 密度峰值聚类算法及其优化策略研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
- [24] 唐佳林, 王镇波, 张鑫鑫. 基于霍夫变换的直线检测技术 [J]. 信息, 2011 (14): 33.