

文章编号: 1673-3193(2024)02-0146-12

面向无人机的可穿戴手势识别综述

游昌欣¹, 韩晶¹, 方帆², 任兵¹, 李玉菡¹, 曹杨³, 李洁³

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中国人民解放军32382部队, 北京 100072;
3. 中北大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 无人机实现通用化的关键之一是开发一种自然、直观的交互方式。手势作为日常生活中最普遍的交流方式之一, 成为研究无人机人机交互的重点。本综述聚焦于穿戴式手势传感与识别方法, 分析了肌电、应力应变、运动、超声和光电传感等主要手势数据的采集方式, 并提出了动态和静态手势的数据处理与识别算法。此外, 本综述还探讨了手势识别技术在无人机实时避障、路径规划与轨迹跟踪方面的应用。最后, 总结了当前手势识别技术面临的普适性、鲁棒性和实时性等关键问题, 并讨论了未来可穿戴手势识别技术的发展方向。通过与生物传感技术、边缘计算、云计算、强化学习、自适应学习以及多模态数据融合等技术的紧密结合, 推动手势识别技术朝着更高精度、更自然的交互方式和更广泛的应用领域发展。

关键词: 可穿戴设备; 手势识别; 人机交互; 无人机; 传感技术

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.02.003

引用格式: 游昌欣, 韩晶, 方帆, 等. 面向无人机的可穿戴手势识别综述[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 146-157.

YOU Changxin, HAN Jing, FANG Fan, et al. A review of wearable gesture recognition for unmanned aerial vehicles[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(2): 146-157.

A Review of Wearable Gesture Recognition for Unmanned Aerial Vehicles

YOU Changxin¹, HAN Jing¹, FANG Fan², REN Bing¹, LI Yuhuan¹, CAO Yang³, LI Jie³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Unit 32382 of PLA, Beijing 100072, China;
3. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: One of the keys to the generalization of UAVs is the development of a natural and intuitive interaction method. Gesture, as one of the most common communication methods in our daily life, has become the focus of research on UAV human-computer interaction. Focusing on wearable gesture sensing and recognition methods, this review analyzed the main gesture data acquisition methods such as electromyography, stress-strain, motion, ultrasound, and optoelectronic sensing, and proposed data processing and recognition algorithms for dynamic and static gestures. In addition, this review discussed the application of gesture recognition technology in real-time obstacle avoidance, path planning and trajectory tracking for UAVs. Finally, the key issues facing current gesture recognition technologies, including pervasiveness, robustness and real-time performance, were summarized, and future directions for wearable gesture recognition technologies were discussed. The close integration with biosensing technology, edge computing, cloud computing, reinforcement

收稿日期: 2023-06-25

基金项目: 中央引导地方科技发展基金资助项目(51903225); 中国航天伺服驱动与传动实验室开放基金资助项目(LASAT-20210302)

作者简介: 游昌欣(1999-), 男, 硕士生, 主要从事无人系统与控制的研究。E-mail: 1741142661@qq.com.

learning, adaptive learning, and multimodal data fusion, can drive gesture recognition technology toward higher accuracy, more natural interaction, and a wider range of application areas.

Key words: wearable devices; gesture recognition; human-computer interaction; UAV; sensing technology

0 引言

无人机具备广阔的活动空间和范围,与其他自动化设备相比,其在农业植保、航拍、电力巡检、战场侦察和救援工作等领域中得到了广泛应用。无人机的优势主要表现在提高工作效率、降低人力成本和保障工作安全方面。随着科技的不断发展,无人机的任务也面临着日益复杂化的挑战,如无人机3D打印、丛林协同作战,无人机执行任务的方式也从单一变成集群。未来将有越来越多的智能化武器装备加入各种形式的战争中,而战场环境的高度动态性、不确定性、对抗性等特征也将变得愈发明显。

目前出现的新型可穿戴设备具有便携性和无需手持操作的特点。同时,可穿戴设备通过整合加速度计、陀螺仪和肌电传感器等各种传感器来准确捕捉手部动作,从而实现更精准的手势识别。在识别算法方面,计算机视觉和机器学习的进步使得手势识别变得更加稳定可靠。边缘计算、云计算、强化学习、自适应学习以及多模态数据融合等技术与传感器信号的融合可以提高设备对更加复杂的手势变化的学习能力,从而更准确地解读用户的意图。因此,可穿戴设备与手势识别算法的结合有效满足了对用户无人机控制的需求,简化了无人机的操控,提供了更直观和自然的交互方式,增强了响应性,使用户获得了更好的体验感。

近些年,无人机的人机交互界面设计已开始转向现代用户界面^[1],虚拟现实、增强现实以及元宇宙等技术要求在控制无人机时提高操纵者的体验感,不仅要使无人机控制方式自然,还需要操纵者能“身临其境”。然而,在各类人机交互过程中,还有如环境因素对视觉交互的干扰、控制实时性和准确性差^[2],交互方式单一导致的用户认知负荷^[3]、交互过程中的信息丢失^[4]、人生理变化和心理变化对无人机控制的影响等问题亟待解决。这些问题已经成为当前无人机人机交互普适性差而无法实现通用化的重要原因。

手势是人们用来表达思想和感情的一种方式,它可以帮助双方更加清晰地理解谈话中传递的信息^[5]。手势控制的交互方式在不同环境下的鲁棒性最好^[6],并且技术难度不高,相比之下成本也要低很多。因此,基于手势的人机交互是对传统无人机控制的有益补充。

可穿戴手势识别技术主要依靠各类传感器收集手势运动、肌电、血压等信息,并从中提取特征而进行手势识别。基于可穿戴设备的无人机控制能够释放双手并且避免了复杂背景的干扰以及手势在摄像头视野之外而导致的无法接收指令、遮挡和人员密集而无法准确定位操纵者的固有缺陷,不仅可以从感知角度克服遮挡问题,而且可以结合触觉反馈形成闭环沉浸式体验。

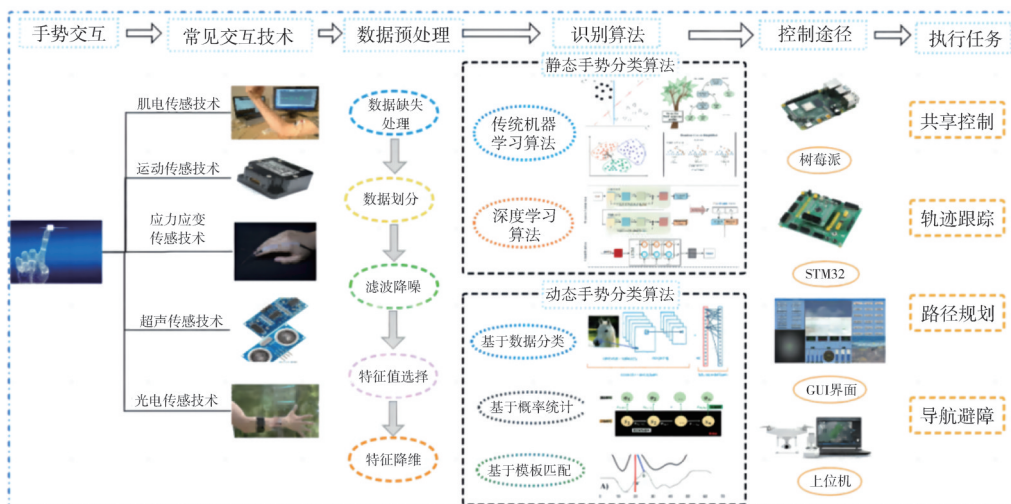


图 1 面向无人机的可穿戴手势识别技术

Fig. 1 Wearable gesture recognition technology for UAV

本文从不同类型的传感技术出发,综述了面向无人机的可穿戴手势识别技术,整体结构如图1所示。

首先,介绍了肌电传感技术、应力应变传感技术、运动传感技术、超声传感技术和光电传感技术等基于可穿戴设备的手势信息传感技术。

其次,针对动静态手势分别梳理了不同类型的手势数据处理与分类的算法。静态手势识别算法主要包括传统机器学习算法与深度学习算法两类。动态手势识别中需要考虑手势信号的时序性,因此,深度学习、基于模板匹配、基于概率统计的识别算法因满足时序性要求而被广泛应用于动态手势识别算法中。再次,进一步讨论了手势识别技术在无人机实时避障、路径规划与轨迹跟踪中的应用。最后,针对现阶段手势与无人机交互存在的一些问题进行了分析并展望了其发展前景。

1 穿戴式手势传感原理

无人机在飞行时极易受环境的干扰或者由于操作者的失误而导致无人机失控、炸机,因此,无人机的人机交互方式必须有极高的鲁棒性、实时性以及普适性。研究表明非语言交流在生活中很重要,因为与不超过35%互动的口头交流相比,它传达了大约65%的信息^[7],其中手势交互是人机交互中最常用、最重要的一种方式。Tezza等^[8]对无人机的人机交互方式进行了比较,分析了多种人机交互模式的优缺点。相比其他交互方式,手势人机交互具有易于控制和较短的训练时间的优点。手势识别方式按照系统捕获手语手势的方式可以分为两大类:基于视觉的系统(使用一个或多个摄像头捕获手势)和基于设备的系统。国外

研究综述中提到通过视觉识别手势时会有一些手势很相似,并且在跟踪两只手的手势动作时会出现重叠^[9]。显然,基于视觉的手势识别方式不适用于有高实时性、高安全性要求的人机交互系统。本文主要针对用于无人机控制的可穿戴手势识别展开讨论。

手势识别技术随着人工智能的快速发展而逐渐成熟,但其普遍受到硬件、算法和安全等限制。近年来,新材料、新兴传感技术和小型化嵌入式系统的出现使得可穿戴设备佩戴更加舒适,信息获取也更加方便快捷^[10],这些新型的可穿戴手势传感设备如电子皮肤^[11]、电子手环等将人类与智能硬件连接起来,促进了康复、假肢控制、增强外骨骼、手语识别、人机交互和用户认证^[12]等的发展。

传统可穿戴设备体积大、数据采集效果差、传输速度慢,有时会因为与用户手部贴合度差而导致皮肤以及关节的应变特征的丢失,从而导致识别失败。为了解决这些问题,肌电传感技术、应力应变传感技术、运动传感技术、超声传感技术、光电传感技术等可穿戴手势信息传感技术随之出现。

1.1 肌电传感技术

肌电传感技术利用肌肉收缩引起的电信号变化,记录并捕捉表面肌电信号(sEMG)。作为一种穿戴式手势识别方法,由于表面肌电信号的高信息传输速率和高时间分辨率使其成为目前的主流技术之一。此外,由于肌电传感技术主要依靠人体皮肤组织的信息,所以对环境的抗干扰能力较强,但是必须保证与皮肤有良好的贴合度才能实现好的传感效果。肌电传感技术的相关总结如表1所示。

表1 肌电传感技术研究总结

Tab.1 Summary of research on electromyography sensing technology

传感技术	识别系统、识别方法	贡献	优缺点
肌电传感技术	提出了使用肌电图和手臂传感器的手语识别系统 ^[13] 。	针对sEMG信号弱的问题提出了一种基于表面肌电信号的在线自动分割技术。	优点:响应速度快、佩戴舒适和精度高等优势,可以捕捉微小的肌肉动作,实现精细的手势识别和控制。
	设计了一种穿戴舒适方便、价格低廉、信号质量良好的柔性肌电传感器 ^[14] 。	对输入信号进行多通道差分计算,使信号更加稳定;迁移学习方法改善泛化性。	
	根据表面肌电信号的特点,研制了多通道高精度的表面肌电信号采集模块 ^[15] 。	提出基于sEMG信号的指关节姿态及力度识别算法,识别准确率可达97%。	缺点:实际应用中面临肌电信号微弱、易受干扰的问题,易受肌肉疲劳和皮肤汗液等因素的影响 ^[17] 。
	设计了超薄、柔性、透气的皮肤表面电极 ^[16] 。	使设备能够舒适地层压在人体皮肤上,同时实现局部扩增。为设计高质量生物信号采集的皮肤电极提供了参考。	

肌电传感技术也面临着许多挑战,诸如噪音、用户之间的差别以及复杂信号的处理。集成

高性能、柔性、透气的电解质的有机电化学晶体管将作为高性能柔性有源器件,也是未来肌电传

感技术的发展方向。

1.2 应力应变传感技术

手部动作会引起肌肉之间角度的变化,这些

变化可以通过应力应变传感器进行采集。常见的应力应变传感方法包括肌压传感、电阻式接触传感和电容传感,应力应变传感技术的相关总结如表 2 所示。

表 2 应力应变传感技术研究总结
Tab. 2 Research summary of stress-strain sensing technology

传感技术	识别系统、方法	贡献	优缺点
应力应变传感技术	将FMG信号应用在仿生机械手的感知系统中 ^[18] 。	提高了肌压传感器多动作模式识别的泛化能力和准确度。	优点:高精度:可以捕捉到微小的手势变形,实现精细的手势控制;实时性:传感器可以快速响应手势变化,并实时反馈识别结果;自然性:用户可以通过简单、直观的手势完成操作,提供更加自然和便捷的用户体验。 缺点:存在对用户的限制和不适感;不同用户的手势特点和手势执行方式可能有差异,需要对传感器参数进行校准和个性化设置,增加了配置和调整的复杂性;可能受到外界因素如温度、湿度等的影响,导致信号干扰或误识别的问题。
	研发了一套肌压信号采集系统 ^[19] 。	解决了肌压信号采样频率、电极偏移、初始压力造成的识别准确率低的问题。	
	利用一种固定在手背上的应变片传感器来识别手势 ^[20] 。	解决了传统的数据手套上传感连接复杂、材质僵硬导致的用户舒适度低,且手部有杂物、汗渍而导致的数据采集效果差的问题。	
	设计了一款高弹性石墨烯气体凝胶和刚性金属电极之间的可变接触电阻 ^[21] 。	为人机界面、机器人、柔性电子和触觉技术中的应用提供新的契机。	

总体来说,应力应变传感技术受环境的影响较小,成本低廉,相比电气传感技术的数据复杂度低,而电气传感技术需要将电极与皮肤接触,至少需要将2~3个电极连接到皮肤上,这样会导致用户体验感差且配置难度高。因此,需要设计贴合性好、更亲肤的柔性应力应变传感器来提高用户体验以及防止由于贴合度不够而导致的手部信息丢失。

1.3 运动传感技术

运动传感技术是主要依靠运动姿态传感器对物体的运动姿态数据进行采集的技术,主要采集方式

是利用惯性传感器对角速度、角度、加速度进行采集。佩戴运动传感器的用户在执行手部运动时,速度和运动幅度等参数有所差异,即使是同一个人在不同时间的动作也可能存在差异,因此,设计一种具有自适应能力并且可以对手部姿态模型进行实时更新的可穿戴式手势识别技术是生活生产中实现通用化的关键。基于惯性传感器的人体手势动作识别方式成本低且不容易受到外界干扰。但是,目前惯性传感器普遍穿戴复杂,难以准确识别人体细微动作且需要对其信号进行活动段检测,因此对识别算法要求较高。典型的运动传感技术的相关总结如表 3 所示。

表 3 运动传感技术研究总结
Tab. 3 Summary of research on motion sensing technology

传感技术	识别系统、方法	贡献	优缺点
运动传感技术	采用MPU6050,通过手势零速检测校准方法设计了一种人体手势识别系统 ^[22] 。	解决了可穿戴设备噪声干扰、特征提取难、识别精度不足的问题,以及陀螺仪漂移和数据噪声问题。	优点:运动传感器的多样性和灵活性使其适用于不同的应用场景,可以实现多样化的手势识别需求。 缺点:运动传感技术在复杂和非常规手势的识别方面还存在一定的限制。
	设计了基于MPU6050传感器的手势识别方法 ^[23] 。	该方法可以减小因用户操作差异而造成的误识别的影响。	
	设计了一种基于可穿戴手套的机器学习的实时智能人机交互方法 ^[24] 。	由弯曲传感器和IMU传感器采集的信号传输到集成在手套上的STM32微处理器中,从而完成手部运动检测。	

1.4 超声传感技术

在可穿戴手势识别中,超声传感技术根据其基本原理方法大致可以分为三类:1)基于多普勒效应的超声波传感技术,主要依赖人类手掌运动引起的多普勒效应,从手势动作的多普勒频移信息中提取

特征;2)采用多个超声换能器组成的阵列来估计手的位置;3)基于手势测距和跟踪的超声波手势识别方法,典型的超声传感技术的相关总结如表 4 所示。

相比其他传感技术,超声传感器具有指向性好、信号采集稳定、功耗低、分类准确率高等优点。此外,与基于图像处理的手势识别系统相比,超声检

测技术的所有传感器元件都可以集成到设备表面中,并且该技术不存在光照和遮挡问题,但是超声波在空气中衰减速度快,不适合远距离采集信号。未来的研究可以在传感器设计和信号处理算法方面进行

改进,以提高超声传感技术在手势识别领域的性能和可靠性。典型的超声传感技术相关总结如表4所示。

表4 超声传感技术研究总结

Tab. 4 Research summary of ultrasonic sensing technology

传感技术	识别系统、方法	贡献	优缺点
超声传感技术	设计了一种基于信道脉冲响应(CIR)的超声波手指运动感知和识别系统 ^[25] 。	CIR测量可以提供7 mm的分辨率,足以进行轻微的手指运动识别。	优点: 超声传感技术在手势识别中具有高精度、非接触式和稳定性等优点。 缺点: 存在信号衰减和失真、易受环境干扰等问题。
	提出一种低复杂度的40 kHz的超声波手势识别系统 ^[26] 。	对运动时间变化具有高鲁棒性。	
	设计了一种基于经验模态分解与数字滤波器相结合的信号滤波新方法 ^[27] 。	将提取到的小波包系数的能量特征作为分类器的特征获得了更好的分类结果,信号处理时间也被缩短。	

1.5 光电传感技术

光电传感中的光电容积描记术(PPG)是一种常用的方法。该技术利用光学心率传感器,将发

光LED发射的特定波长的光入射到人体特定部位的表皮皮肤上,然后通过光敏传感器接收对应的反射光或入射光来检测脉搏信号。典型的光电传感技术相关总结如表5所示。

表5 光电传感技术研究总结

Tab. 5 Research summary of photoelectric sensing technology

传感技术	识别系统、方法	贡献	优缺点
光电传感技术	提出一种通过PPG提取特征以预测人类活动的新方法 ^[28] 。	将提取的运动伪影信号与心脏和呼吸信号相结合。	优点: 为用户提供了更自然、无缝的交互体验,高实时性、高帧率性能使其适用于快速和动态手势的识别。 缺点: 光线条件的变化和阴影可能对传感器的性能产生影响,导致手势的识别和跟踪不稳定。
	提出一种基于主成分归一化和重构的PPG信号处理方案 ^[29] 。	为实现高精度PPG手势识别技术提供了一种新颖的思路。	

在手势识别中也可以使用其他光电感测方法。例如,肌肉收缩导致散斑场强度的变化,这些变化可以通过光纤散斑图传感器来监测。手势变化会导致血管变形并引起血流动力学的变化,因此,可以利用近红外传感器捕获这些信号并通过非侵入性的光谱分析技术(NIRS)来分析识别。光电传感技术没有基线混淆和运动伪影,这就可以避免繁重的过滤过程和减少复杂的模式识别算法的应用,从而进一步降低系统的功耗,同时,光电传感器结构紧凑,易于集成到消费电子产品中。但是,该技术在基于光电传感设备的手势识别方面还存在很多的问题,在真实复杂的场景下也会受到光照和运动的干扰,使其在实际应用中难以保持良好的识别精度。

2 穿戴式手势信息识别算法

实现手势对无人机的实时控制,不仅需要各类传感器对手部数据进行提取,更重要的是还需要对提取的数据进行数据处理以及利用算法对其进行分类。因此,期望的算法不仅需要有高的识别率,还需要轻量级、计算成本低、占用内存小。未来新材

料、新型传感技术和嵌入式系统的小型化可以实现更直观、更舒适的可穿戴界面,而机器学习算法的进步也有助于实现更准确、更强大的分类和跟踪性能^[30]。

2.1 手势信号预处理方法

手势数据处理首先是对数据进行归一化处理,不同手势数据的偏差较大,取值较大的数据影响力会盖过取值较小的参数。因为手势动作的幅度相对较小,指关节较多,对毛刺信号敏感度较强,所以要对数据进行滤波处理,去除信号中的噪声,减小其对识别的干扰。在很多情况下,样本向量的维数比较高,高维数据会给算法设计和运算带来困难,而且不便于可视化处理分类结果,因此,一些学者还会对数据进行降维处理,最常用的两种降维算法是主成分分析与流形学习算法。手势分类算法需要根据不同的特征对手语进行分类,所以需要在数据中进行特征值提取。

洪森^[31]基于可穿戴设备的手语识别算法对手语数据进行归一化、数字滤波、信号特征提取与物理

特征提取,如每个手指的弯曲程度、手指张开度的提取。提取的信号特征可能会由于手势信号的相似性而导致识别失败,可以将特征分为物理特征和信号特征分别进行提取,将手部动作特征作为补充特征来提高识别的准确性。谢普鑫^[32]对从运动传感器中采集的数据进行平滑滤波去噪处理,以窗口差分为特征值来寻找有效数据的起止点,从而进行数据截取,并将数据进行压缩量化以减少存储所需要的空间和计算量。李艳德^[33]设计了一种基于分类结果反馈的变步长滑动窗口结合双阈值的实时手势分段方法,该方法可以兼顾交互的实时性且识别的准确性可达99%以上。Zeybek等^[34]为了解决手势识别的通用性问题,设计了基于小波的手势识别时空特征提取方式,因为每个传感器的特性不同,所以离散小波变换参数也会有所差异,那么通过离散小波变换将传感器信号分解为子带,降低了算法的复杂度,克服了由于数据来自不同维度的每个用户的多传感器所带来的问题。

2.2 手势分类及识别算法

2.2.1 静态手势识别算法

静态手势识别算法主要采用基于数据分类的识别算法,包括传统机器学习算法与深度学习算法两类。

1) 传统机器学习算法。对于分类任务,模型训练涉及经典的机器学习方案^[35],通常包括线性判别分析、支持向量机、随机森林、朴素贝叶斯分类器、决策树、 k 最近邻(KNN)等。

Aryanie等^[36]研究了PCA降维KNN后对其性能的影响。当数据用全维特征表示时,KNN分类器在

$k=3$ 时达到最高的准确率(99.8%),虽然KNN分类器的准确率高,但其识别的时间比较长。赵诗琪等^[37]建立了一种基于FS特征降维方法与机器学习结合的新的手势识别模型,该模型将概率图模型(LDA)与支持向量机(SVM)分别作为分类器,并比较了其准确率与训练时间,最终LDA的准确率为99.24%,训练时间1.44 ms。Wang等^[38]利用弯曲传感器来采集手势样本数据,并利用改进的粒子群算法(PSO)优化SVM的核参数值,将该算法用在手势识别的人机交互系统中,克服了传统PSO算法容易陷入局部最优的问题。但是,手动提取和选取的特征可能导致算法性能存在较大的差异。传统机器学习主要依赖于专业知识,并且通常仅提取浅特征,完成复杂任务的能力有限。

2) 深度学习算法。随着深度学习技术的进步,越来越多的研究使用了基于卷积神经网络的解决方案。神经网络结构的灵活性可以使目标输出分解为分类问题、回归问题或组合问题。深度学习算法中使用最频繁的就是卷积神经网络(CNN)。

Yuan等^[39]提出一种改进的深度特征融合网络(DFNN)来进行手势识别。在特征提取方面,该文给出了一种基于卷积神经网络(DCNN)的特征融合策略,通过提取浅层和深层特征来融合多传感器的数据。周旭峰等^[40]采用循环神经网络(RNN)对EMG信号进行了分类。通过对原始信号进行时域、时频域、频域特征拓展,获得原始信号的多流特征序列,组合RNN识别算法实现sEMG信号识别的模型如图2所示,该模型能够在61.7 ms内识别手势动作。

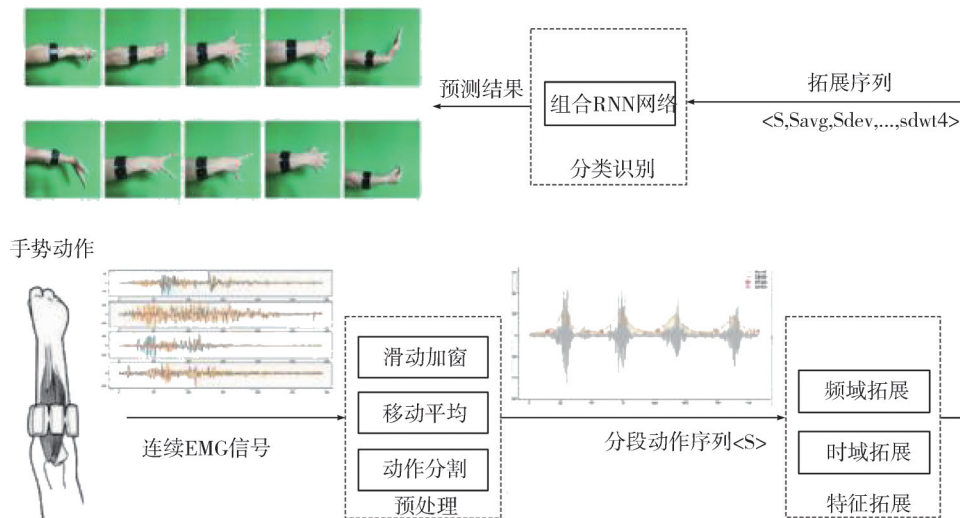


图2 组合RNN网络模型^[40]

Fig. 2 Composite RNN network model^[40]

从以上的研究还可以发现,对于静态手势识别,手势信息中最常用的特征有均值、方差、峰值、脉冲和裕度。不论是传统的机器学习算法还是基于神经网络的深度学习算法都需要对提取的特征进行学习,但神经网络需要对原始信号的时域、频域特征进行拓展。静态手势识别技术可以满足无人机飞行模式的切换需求,因为在无人机飞行过程中不需要对其模式进行连续切换。但是,无人机在飞行过程中的受力较为复杂,需要实时手势来调整无人机的姿态,静态手势显然无法满足此需求。

2.2.2 动态手势识别算法

在动态手势识别中,由于时间步无法对齐,两个不同的符号不能使用欧几里得空间进行比较。基于模板匹配的手势识别算法与基于概率统计的手势识别算法由于能够对齐符号帧并计算相似性而得到广泛应用,此外深度学习算法也经常用在动态手势的识别中。

1) 基于模板匹配的手势识别算法。典型的基于模板匹配的手势识别算法为动态时间规整(DTW)

算法。DTW算法的原理是计算两个序列各个点之间的距离矩阵,然后从矩阵左上角到右下角的路径当中寻找一条可以使得路径上元素和最小的路径。DTW算法解决了欧氏距离搜索算法中时间步不能对齐的问题,但是匹配速度慢、计算量大。

谢毅^[41]从识别精度与时间复杂度两个方面分别讨论了HMM与DTW这两种手势判别算法,提出了优化的DTW算法以及基于多阈值的手势检测和非手势的过滤方式,不仅对手部动作进行活动段检测,排除了无关手势的干扰,还提升了识别速度与效率。与静态手势相比,动态手势更直观地反映了人的意图,但是动态手势的速度差异会造成时间序列上的失配,针对这一问题,Cai等^[42]提出了一种基于动态时间规整(DTW)算法的动态手势识别方案,如图3所示。该方法基于DTW算法对动态手势的时间序列进行匹配,通过计算不同时间序列之间的最小欧氏距离进行预测。该研究首次实现了A型超声波的动态手势识别,证明了超声波信号的潜力,提供了更广泛的使用场景。

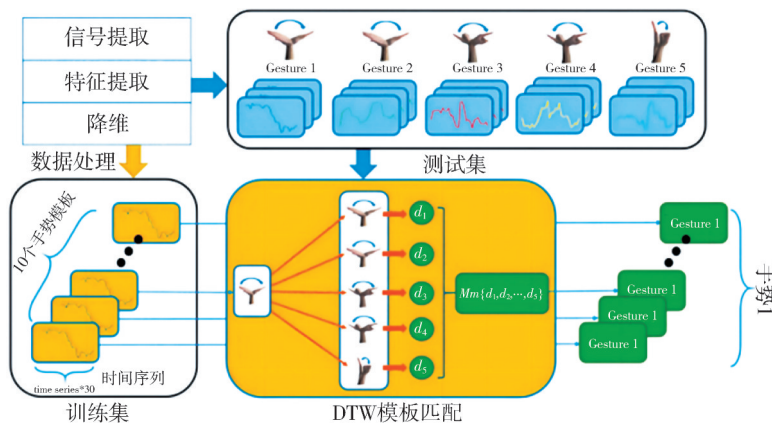


图3 DWT算法模型^[42]

Fig.3 DWT algorithm model^[42]

2) 基于概率统计的手势识别算法。基于概率统计的识别方法中最典型的是隐性马尔科夫模型(HMM)。该模型在训练时为每一种手势对应一个马尔科夫模型,识别时取概率最大的一个模型。HMM能够对信号的时空变换进行建模,这就意味着HMM有较高的计算复杂度。减小数据量可以降低复杂性,但会降低识别精度。因此,需要找到一种在降低复杂性的同时保持识别准确性的方法。

严焰等^[43]采用改进的SWAB算法对动态加速度数据进行自动端点检测,通过HMM对提取的特征进行手势指令建模,在提高识别器整体鲁棒性的同时减轻了移动平台硬件计算和存储的压

力。于美娟等^[44]讨论了HMM算法的不足,针对不同人做同一动作时间不同的问题设计了一种基于动态规划算法的HMM方法,采用自底向上的逆序方法,递归地建立了应用于HMM识别的最优状态模型,解决了HMM算法计算复杂度高的问题,提高了计算效率。

3) 基于数据分类的神经网络手势识别算法。Dong等^[45]提出了一种新型动态手势识别算法(DGDL-GR)来识别人类动态手语。该算法提取了手指阻力运动的时域特征和手指阻力弯曲的空间域特征,手势特征的长期和短期依赖性最终都被深度挖掘和分类。

张炳亮^[46]利用肌电传感器和惯性传感器来采

集手势数据,设计并训练了CNN模型,在固化CNN模型某些网络层后,通过采集少量新数据来训练更新CNN模型未固化的网络层权值,以实现对新数据的高鲁棒性识别。DelPreto等^[47]利用sEMG传感器来采集肌肉的信号,算法流程如图4所示。在线聚类算法可以对姿态模型进行更新,这就可以提高对不同的人执行同一个动作识别的准确率,极大地提高了手势识别的普适性,这也是今后手势识别实现商业化需要解决和优化的最大问题。

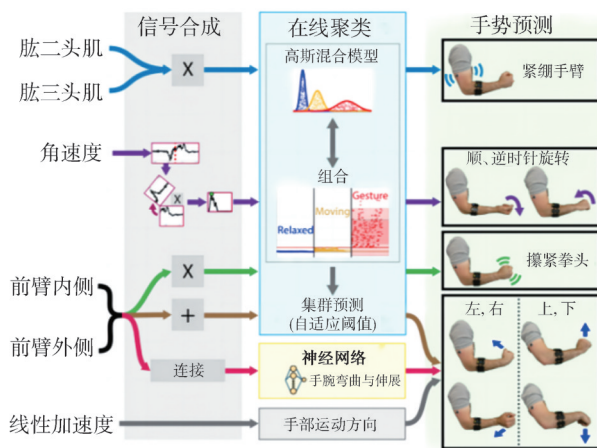


图4 自适应阈值的在线聚类算法^[47]

Fig. 4 An adaptive threshold online clustering algorithm^[47]

相比于静态手势识别,动态手势的识别算法涉及到手势分割、活动段划分。在识别的过程中动态手势需要考虑动态时序的特征,而不仅仅是简单的特征提取。此外,手势识别算法不仅需要关注其识别的准确率,在面对一些硬实时系统时,更需要关注其实时性,识别所用的时间不仅关系到用户体验,更重要的是在控制无人机时,微小的时间延迟就可能导致事故的发生。

2.3 融合信号识别算法

对于特定场景下的手势识别,单一的手势识别算法可能会存在一定的局限性。为了克服这些问题,并提高手势识别的准确性和可靠性,研究人员开始探索融合多种手势识别算法的方法。

刘岚馨^[48]设计了基于肌电信号、形变信号和惯性信号的多传感器融合手势识别算法,融合加权KNN与GMMHMM-SVM算法后的识别准确率可达97.33%,但还存在样本数据量大的缺点。同时,该算法将树莓派作为嵌入式信号处理模块,用于无人机控制模拟软件的交互当中。周杨^[49]引入多流融合策略与数据增强方法,结合卷

积神经网络和循环神经网络,从信号数据与算法网络两方面来解决泛化问题及采集样本数量不足的问题,而且通过数据增强方法将EMG信号识别的准确率从54.07%提升至64.67%,训练时间也缩短至原来的1/3。王涛等^[50]提出了门控循环单元-双向长短时记忆循环神经网络(GRU-BiLSTM)实时手势分类算法,将IMU与sEMG传感器作为手势采集设备,采用特征分层机制,经过交叉验证与参数整定,得出最优的参数分类,最终的识别准确率可达85.4%,且从动作开始到输出结果仅需0.6s。与基于机器学习的分类算法相比,该方法在准确率与计算效率上具有优势。王天然等^[51]介绍了基于迁移学习的跨对象手语手势识别方法,建立了一种基于深度学习的模型,将表面肌电流和惯性运动信号作为输入,通过域对抗训练来消除不同手语使用对象之间的差异。实验结果表明,该模型在对象依赖和对象独立的手语识别实验中都取得了较高的准确率,并且具有较好的泛化能力。这项研究对于提高手语识别的准确性和稳定性具有重要意义。这些例子表明,融合算法在提高手势识别性能方面具有普适性,并能够克服单一手势识别算法的缺点。

上述研究表明,在复杂环境下采用单一通道采集手势信息不足以明确表达信息发出者的意图,而融合信号识别算法可以避免传感设备产生认知负荷,加快识别速度,从而使无人机能够可靠地执行任务。

3 手势识别在无人机上的应用

3.1 实时避障

无人机与人交互时,若采用单一手势交互可能会由于用户操作失误而导致交互的稳定性较差,而完全自主控制模式在一些复杂环境下无法实现最优控制且用户缺乏参与感。因此,需要将人与自动控制系统结合起来,并基于距离、手部疲劳度等约束条件实时更新人机控制指令权重,以实现无人机飞行的实时控制。

Budiyanto等^[52]设计了一种可穿戴设备,可以检测手势并向Dji Tello无人机发出指令。该设备采用树莓派与无人机进行通信,将陀螺仪MPU6050连接到树莓派并作为输入传感器,从而获得手部动作的角度,将其作为Dji Tello无人机的执行命令。经过测试得出该设备处理速度为

89 ms, 操控无人机时的平均单圈时间比操纵杆控制器约少 19 s。DelPreto 等^[47]设计了可穿戴运动传感器, 使没有受过训练的用户也可以远程驾驶无人机绕过障碍物, 实验表明参与者可以成功地使用手势控制无人机的位置, 如图 5 所示。

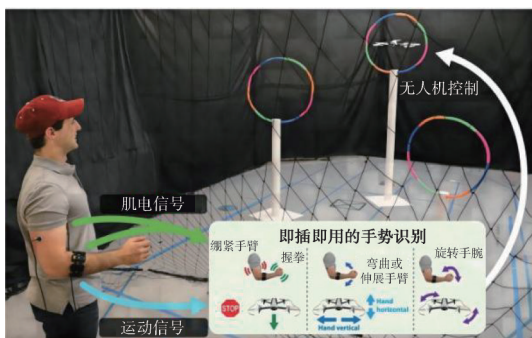


图 5 可穿戴设备的无人机实时避障控制^[47]

Fig. 5 The obstacles avoidance controlling in real time of UAV by the wearable device^[47]

综上所述, 虽然使用手势控制可以改变无人机的位置, 但是要实现对其姿态的连续操作仍面临很大挑战, 因此, 未来的研究中应着重改进手势识别算法, 并探索额外的传感器技术, 以提高手势控制无人机系统的精确性和响应性。

3.2 路径规划

无人机路径规划是指在特定的条件约束下, 通过智能算法寻找到达目标点的最优路径, 该路径要求距离短、安全性好, 而且路径规划的实时性要求高。安全合理的路径规划是提高无人机工作效率的有效手段。

Akagi 等^[53]在设计可穿戴数据手套时采用了加速度计和陀螺仪结合的方式来捕获手势动作, 通过 Arduino 使其与计算机进行连接以实现与无人机的通信, 并通过手势协同来规划无人机路径, 每个手势都对应无人机的某一个特定搜索与跟踪任务。其研究表明, 该系统可作为一种自然界面来帮助操作员控制无人机的行为。Gonzalez^[54]利用基于手势识别的控制算法实现无人机人机共享控制并能够应对恶劣环境。同时, 利用微分方程的轨迹生成算法和分布式路径规划算法实现了无人机对动态目标的追踪和自主导航。

综上所述, 将手势控制加入到无人机飞行路径规划当中, 通过结合机器智能和人类智能的优势可以克服现有有人工智能系统的不足, 达到“1+1>2”的效果。同时, 结合人员指令与当前环境信息, 可以实现复杂情况下的路径规划。

3.3 轨迹跟踪

传统无人机一般使用 RF 射频遥控器进行控制, 如果要让无人机在空中按照复杂的飞行轨迹飞行就需要有经验的操纵者来操作, 因此这种控制方法对新手飞行员并不友好。将人体手部的运动轨迹映射到四旋翼飞行器的飞行轨迹上可以更加灵活地控制无人机, 这就降低了操作门槛。

Shin 等^[55]设计了一种可穿戴设备来控制无人机的飞行轨迹。其采用陀螺仪加速度计测量手部动作的变化, 并发送到无人机树莓派中, 因此, 即使是新手也可以让无人机根据自己的手势起飞、降落和改变飞行方向, 还可以根据一系列手势做出不同的飞行轨迹。Paterson 等^[56]设计了一个面向虚拟现实的开源空中轨迹跟踪平台。无人机轨迹跟踪飞行如图 6 所示, 与手动控制界面相比, 该方法的安全性和主观可用性有显著改善。这些研究为无人机的控制和导航提供了新的方法, 可以促进无人机在多个领域的应用和发展。

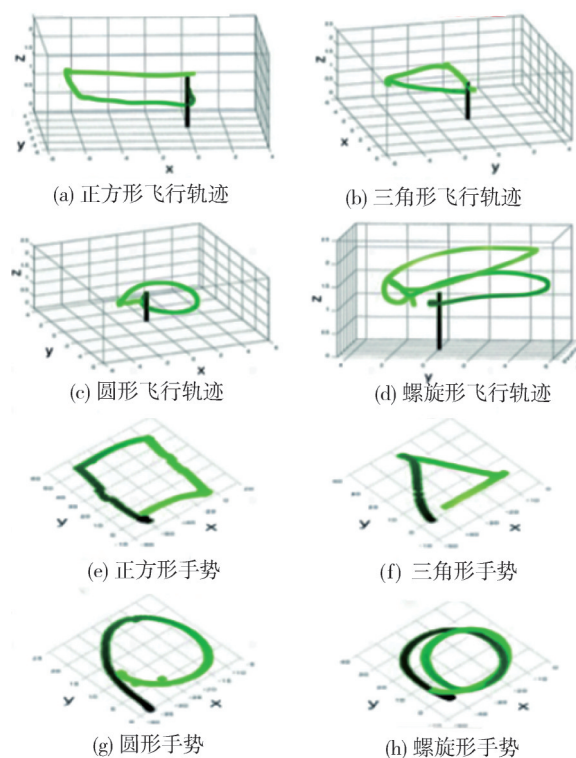


图 6 无人机飞行轨迹的手势控制^[55]

Fig. 6 Gesture control of UAV flight path^[55]

4 结论

本文综述了可穿戴手势识别技术的发展和其在无人机控制方面的应用。1) 主要介绍了主流的

可穿戴手势传感技术类型,分析了其相对于传统设备的优势,包括小型化、低成本和高实时性。但是,目前的可穿戴手势传感设备在柔软性和贴合度方面仍需要改进,以提高用户体验和数据采集的完整性。2)目前针对静态和动态手势识别的研究,主要采用了传统机器学习算法、深度学习算法以及基于模板匹配和概率统计的手势识别算法。未来的研究可以扩大手势集以提高准确性,并可将多种传感技术进行融合,开发功能更强大的感应技术。3)鲁棒性仍然是手势识别面临的一个重要问题,即插即用的手势识别算法是当前发展的方向。4)讨论了可穿戴手势识别技术在无人机控制方面的应用,包括手部轨迹跟踪飞行、路径规划和实时避障等。

可穿戴手势识别技术与多种人工智能技术相融合是未来的发展方向,例如将生物传感技术、边缘计算、云计算、强化学习、自适应学习、多模态数据融合、实时反馈技术与可穿戴手势识别技术相结合去推动可穿戴手势识别技术向高准确率、高效率方向发展。同时,未来需要提高手势识别的普适性和鲁棒性以满足更多人的需求,使其更加符合人类的意图与习惯,从而提供更直观、自然的用户体验。

参考文献:

- [1] 张涛, 芦维宁, 李一鹏. 智能无人机综述[J]. 航空制造技术, 2013, 432(12): 32-35.
ZHANG Tao, LU Weining, LI Yipeng. Overview of intelligent UAV [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 432(12): 32-35. (in Chinese)
- [2] 侯永宏, 叶秀峰, 张亮, 等. 基于深度学习的无人机人机交互系统[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(9): 967-974.
HOU Yonghong, YE Xiufeng, ZHANG Liang, et al. UAV human - computer interaction system based on deep learning[J]. Journal of Tianjin University, 2017, 50(9): 967-974. (in Chinese)
- [3] SWELLER J. Cognitive load during problem solving: effects on learning [J]. Cognitive Science, 1988, 12 (2): 257-285.
- [4] 李秘. 基于语音和肢体动作的无人机人机交互技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [5] CHEOK M J, OMAR Z, JAWARD M H, et al. A review of hand gesture and sign language recognition techniques[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2019, 10(1): 131-153.
- [6] ABDALLAH M B, KALLEL M, BOUHLEL M S. An overview of gesture recognition [C]//2012 6th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications, 2012: 20-24.
- [7] MOHAMED N, MUSTAFA M B, JOMHARI N. A review of the hand gesture recognition system: Current progress and future directions[J]. IEEE Access, 2021, 9(9): 157422-157436.
- [8] TEZZA D, ANDUJAR M. The state-of-the-art of human-drone interaction: A survey[J]. IEEE Access, 2019, 7(7): 167438-167454.
- [9] DEBAJIT S, BHUYAN M K. Methods, databases and recent advancement of vision-based hand gesture recognition for HCI systems: A review[J]. SN Computer Science, 2021, 2(6): 436.
- [10] 刘粤. 可穿戴设备人机交互情境下的手势交互设计与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [11] LEE G W, SON J H, LEE S Y, et al. Fingerpad-inspired multimodal electronic skin for material discrimination and texture Recognition[J]. Advanced Science, 2021, 8(9): 202002606.
- [12] JIANG S, KANG P, SONG X, et al. Emerging wearable interfaces and algorithms for hand gesture recognition: a survey [J]. IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 2022, 15(15): 85-102.
- [13] WU J, TIAN Z, SUN L, et al. Real-time american sign language recognition using wrist-worn motion and surface EMG sensors [C]//2015 IEEE 12th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), 2015: 1-6
- [14] 陈艺琛. 基于肌电信号的手势识别系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [15] 傅舰艇. 基于表面肌电信号控制的仿人型假手研究 [D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2020.
- [16] WANG J B, LEE S H, YOKOTA T Y, et al. Nano-mesh organic electrochemical transistor for comfortable on-skin electrodes with local amplifying function [J]. ACS Applied Electronic Materials, 2020, 2 (11) : 3601-3609.
- [17] SHENG X, DING X, GUO W, et al, Toward an integrated multi-modals EMG/MMG/NIRS sensing system for human-machine interface robust to muscular fatigue [J]. IEEE Sensors, 2021, 21 (3) : 3702 - 3712.
- [18] 林连冬. 基于仿生机械手的肌动传感器动作识别研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2017.

- [19] 雷光泰. 肌压信号采集系统设计与手势识别评估[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- [20] LIN G W, WANG C, HUANG YY, et al. Back-Hand: Sensing Hand Gestures via Back of the Hand [C]//Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST'15), 2015: 557-564.
- [21] KUMAR P H, SILHAVIK M, ZAFAR Z A, et al. Contact resistance based tactile sensor using covalently crosslinked graphene aerogels[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(4): 1440-1451.
- [22] 龙江腾. 基于运动姿态传感器 MPU6050 的人体手势识别研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021.
- [23] 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. ZHANG Ping, LIU Zuoshi. Gesture recognition method based on inertial sensor MPU6050[J]. *Sensor and Microsystem*, 2018, 37(1): 46-49. (in Chinese)
- [24] TAHA M, MEHMET K. An intelligent human-unmanned aerial vehicle interaction approach in real time based on machine learning using wearable gloves [J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1766.
- [25] LING K, DAI H, LIU Y, et al. Ultra gesture: fine-grained gesture sensing and recognition [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(7): 2620-2636.
- [26] ZHOU F F, LI X Y, WANG Z H. Efficient high cross-user recognition rate ultrasonic hand gesture recognition system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(20): 13501-13510.
- [27] CHENG L L, WANG J J, LI C J, et al. Classification of MMG signal based on EMD [C]//Advanced Computational Methods in Life System Modeling and Simulation. *Communications in Computer and Information Science*, 2017: 23-34.
- [28] MEHDI B H, CAI L H, WU C Y, et al. ActiPPG: using deep neural networks for activity recognition from wrist-worn photoplethysmography (PPG) sensors[J]. *Smart Health*, 2019, 14: 100082.
- [29] RUAN Y W, CHEN X, ZHANG X, et al. Principal component analysis of photoplethysmography signals for improved gesture recognition[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, 16: 1047070.
- [30] HU B, WANG J C. Deep learning based hand gesture recognition and UAV flight controls[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2020, 17(1): 17-29.
- [31] 洪森. 基于可穿戴设备的人体姿态识别研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [32] 谢普鑫. 基于可穿戴设备惯性感应器的手势识别研究与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [33] 李艳德. 基于穿戴传感感知的手势识别模型与应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [34] ZEYBEK T, SAKARYA U. Wavelet-based Spatial-temporal Feature Extraction for Gesture Recognition [C]//2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), 2021: 1-5.
- [35] DANG L M, MIN K B, WANG H X, et al. Sensor-based and vision-based human activity recognition: A comprehensive survey [J]. *Pattern Recognit*, 2020, 108(1): 107561.
- [36] ARYANIE D, HERYADI Y. American sign language-based finger-spelling recognition using k-Nearest Neighbors classifier [C]//2015 3rd International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT), 2015: 533-536.
- [37] 赵诗琪, 吴旭洲, 张旭, 等. 利用表面肌电进行手势自动识别[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(9): 149-156. ZHAO Shiqi, WU Xuzhou, ZHANG Xu, et al. Automatic gesture recognition by surface electromyography [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(9): 149-156. (in Chinese)
- [38] WANG Z H, CAO J T, LIU J G, et al. Design of human-computer interaction control system based on hand-gesture recognition [C]//2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2017: 143-147.
- [39] YUAN G, LIU X, YAN Q, et al. Hand gesture recognition using deep feature fusion network based on wearable sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 539-547.
- [40] 周旭峰, 王醒策, 武仲科, 等. 基于组合RNN网络的EMG信号手势识别[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 424-442. ZHOU Xufeng, WANG Xingce, WU Zhongke, et al. EMG signal gesture recognition based on combined RNN networks [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 424-442. (in Chinese)
- [41] 谢毅. 基于动态手势轨迹识别在无人机上的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [42] CAI S X, LU Z X, CHEN B X, et al. Dynamic gesture recognition of a-mode ultrasonic based on the DTW algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(18): 17924-17931.

- [43] 严焰, 刘蓉, 黄璐, 等. 基于HMM的手势识别研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2012, 46(5): 555-559.
YAN Yan, LIU Rong, HUANG Lu, et al. Research on gesture recognition based on HMM[J]. Journal of Central China Normal University, 2012, 46(5): 555-559. (in Chinese)
- [44] 于美娟, 马希荣. 基于HMM方法的动态手势识别技术的改进[J]. 计算机科学, 2011, 38(1): 251-252.
YU Meijuan, MA Xirong. Improvement of dynamic gesture recognition based on HMM[J]. Computer Science, 2011, 38(1): 251-252. (in Chinese)
- [45] DONG Y F, LIU J L, YAN W J. Dynamic hand gesture recognition based on signals from specialized data glove and deep learning algorithms[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70(1): 1-14.
- [46] 张炳亮. 面向可穿戴设备的手势识别算法研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [47] DELPRETO J, RUS D. Plug-and-play gesture control using muscle and motion sensors[C]//Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human - Robot Interaction (HRI' 20), 2020: 439-448.
- [48] 刘岚馨. 基于可穿戴设备的多传感器手势设计与识别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [49] 周杨. 基于深度学习的肌电手势识别算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [50] 王涛, 吴迎年, 杨睿, 等. 基于IMU与sEMG混合信号的实时手势分类算法研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(2): 359-371.
WANG Tao, WU Yingnian, YANG Rui, et al. Research on real-time gesture classification algorithm based on IMU and sEMG mixed signal[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 359 - 371. (in Chinese)
- [51] 王天然, 王琦, 王青山. 基于迁移学习的跨对象手语手势识别方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(S1): 129-133.
WANG Tianran, WANG Qi, WANG Qingshan. A cross-object sign language gesture recognition method based on transfer learning [J]. Computer Science, 2023, 50(S1): 129-133. (in Chinese)
- [52] BUDIYANTO A, RAMADHAN M I, BURHANUDIN I, et al. Navigation control of drone using hand gesture based on complementary filter algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1912(1): 12-34.
- [53] AKAGI J, MOON B, CHEN X G, et al. Gesture commands for controlling high-level UAV behavior [C]//2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2019: 1023-1030.
- [54] GONZALEZ H A. Robust tracking of dynamic targets with aerial vehicles using quaternion-based techniques [D]. Compiègne: Université de Technologie de Compiègne, 2019.
- [55] SHIN S Y, KANG Y W, KIM Y G, Hand gesture-based wearable human-drone interface for intuitive movement control[C]//2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2019: 1-6.
- [56] PATERSON J R, HAN J, CHENG T, et al. Improving usability, efficiency, and safety of UAV path planning through a virtual reality interface [J]. Symposium on Spatial User Interaction, 2019, 28(1): 1-2.