

# 基于惯性传感器动作捕获系统的仿人机械手的研究

徐梦洁, 舒双宝, 纪峰, 杨蕾, 莫佳辉, 贾琳, 王子童, 张蓉, 王见晗

(合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为了满足某些工业生产的特殊环境需求, 如超净工作环境或有害气体环境等, 本文设计了一种基于惯性动作捕获系统的仿人机械手, 通过可穿戴式的 MEMS 惯性传感器采集手指和手臂姿态信息, 运用卡尔曼滤波算法实时解算其姿态信息, 由无线通信技术传输至机械手主控制系统中, 转换为电机的旋转角度, 实现对机械手的实时随动控制; 并且提供人脸识别的方式来验证操作者的身份。测试结果表明, 仿人机械手识别准确率达到 90%以上, 人脸识别速度可达 250ms, 驱动电机的反应速度稳定在 30~50ms, 能够很好的实现对机械手的实时随动控制。

**关键词:** 动作捕捉; 仿人机械手; 人机交互

## Research on the design of humanoid manipulator based on the motion capture system of inertial sensor

(Xu Mengjie, Shu Shuangbao, Jifeng, Yanglei, Mo jiahui, Jia lin, Wang Zitong, Zhang Rong, Wang Jianhan)

(Hefei University of Technology, Hefei, 230009)

**Abstract:** In order to meet the special environmental requirements of some industrial production, such as ultra-clean working environment or hazardous gas environment, this paper designs a humanoid manipulator based on inertial motion capture system, which collects finger and arm posture information through wearable MEMS inertial sensors and solves the posture information in real time by Kalman filtering algorithm, and transmits it to the main control system of the manipulator by wireless communication technology, converting it into the rotation angle of the motor. The Kalman filtering algorithm is used to solve the posture information in real time, and the Kalman filtering algorithm is transmitted to the main control system of the manipulator by wireless communication technology to convert the rotation angle of the motor and realize the real-time motion control of the manipulator; and the face recognition is provided to verify the identity of the operator; the face recognition speed of the humanoid manipulator is up to 250ms,

and the response speed of the drive motor is stable at 30~50ms, which can realize the real-time motion control of the manipulator well.

**Keywords:** Motion capture; Humanoid manipulator; man-machine interaction

## 1 传感器设计背景和应用价值

随着工业生产的需要,仿人机械手的发展势头十分强劲,但目前大多数机器人的机械手主要针对特定作业设计,存在着灵活性、适应性和精密性不足等缺点。因此,研制出一种能像人手及手臂一样灵巧及精密作业的仿人机械手,代替人手在某些特殊的环境中完成任务,并且能够远程控制其运行轨迹,从而解决一些常见的问题,如高危作业、远程医疗等<sup>[1~4]</sup>。

动作捕获系统的实现有两种形式,一是基于机器视觉,二是基于惯性传感器。前者一般不需要佩戴采集设备,但易受环境因素的影响<sup>[5]</sup>。相对前者,后者识别精度更高。仿人机械手是从上世纪八十年代开始快速发展,其最先是少指仿人机械手的形态开始出现,其中最经典的是 Salisbury 以模块化理念采用钢丝绳作为传动机构设计的模仿人手结构的三指机械手<sup>[6]</sup>,其具有 9 个自由度,并且引入了位置和压力的传感器系统; NASA 在二十一世纪初设计了一种代替宇航员进行舱外作业的五指机械手<sup>[7]</sup>,其在外形上与人手十分相似,并且拥有 14 个自由度配和多种传感器系统具有强大的感知能力,能够完成许多非常精密的工作,但是也造成了仿人机械手的体积过大。仿人机械手的研究在国内开始的较晚,其中张启先院士团队设计机械手 BH-1 在国内处于领先水平<sup>[8]</sup>,但是其功能较为简单;哈尔滨工业大学与德国宇航中心研发一种拥有 13 个自由度机电一体化程度高的仿人机械手<sup>[9]</sup>,其将所有的舵机以及控制器都集成到手指的内部。

当前市场上的冲压机械手、SCARA 结构机械手等仿人机械手系统在工业应用时均能达到较高的精度和应用要求,但是大多结构较为复杂、成本较高<sup>[10~11]</sup>。此外,具有人手随动功能的可控机械手还需要进一步研究。哈尔滨理工大学的刘春花<sup>[12]</sup>在对识别算法展开研究,但是她仅仅只是完成了手势的识别,没有完成其应用;东北农业大学的宁智超<sup>[13]</sup>设计了一种基于 ATMEGA16 的六自由度果实采摘机械手利用视觉系统确定果实的空间坐标并确立机械手的姿态后,完成对机械手的控制,但并未实现与人手随动的功能;西安电子科技大学的刘岚馨<sup>[14]</sup>在对识别系统展开研究的过程中,研发出了一款结合有弯曲传感器、嵌入式电路板、肌电传感器和惯性传感器的可穿戴手势识别设备,并基于该设备对惯性信号、形变信号和融合肌电信号的手势识别算法进行了研究,但她尚未完成在无人机控制方面的研究。S

Mary Vasanthi 和 T Jayasree 二人<sup>[15]</sup>，利用输入的肌电信号来提取 8 个时域特征，从而对手势进行分类，然而他们的研究更集中于解决单手手指运动的分类问题。因此，本文设计了一种基于 K210 芯片人脸识别系统和基于惯性传感器动作捕获技术的仿人机械手，可实现远程实时控制仿人机械手。

## 2 创新点与优势

本文研究了一种基于惯性传感器动作捕获系统的仿人机械手的研究。通过 MEMS 惯性传感器采集人体手指和手臂加速度和角速度信息；在主处理器中通过卡尔曼滤波实时解算其姿态信息，由无线通信技术传输至机械手主控制系统中；设计制作仿人手的结构部分，并采用 SOLIDWORKS 和 MATLAB 联合仿真验证；将采集到的姿态数据转换为机械手驱动电机的旋转角度，实现对机械手的实时随动控制功能。

本文提出将手势识别与机械手的控制系统结合的方法实现实时随动功能。通过基于四元素的卡尔曼滤波算法对九轴传感器的原始数据进行滤波融合，求解出姿态角度等信息，通过无线通信方式实现仿人机械手臂姿态的远程同步控制。可代替人从事存在生产安全隐患的工作，以此提高安全性。

本文通过研究和分析人手的生理结构特征，并总结当前仿人机械手的设计方法，使用 SOLIDWORKS 和 MATLAB 联合对机械手模型进行运动学仿真，最终设计出合理的机械结构。

## 3 实现方案简介

### 3.1 设计原理

将基于惯性动作捕获系统的仿人机械手按照功能分为两个组成部分：手势动作捕捉系统和随动机械手系统，总体系统框图如图 1 所示：

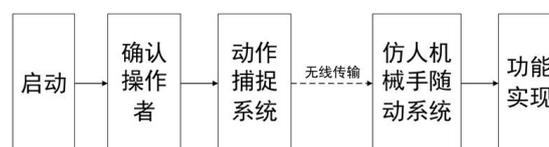


图 1 总体系统框图

Fig. 1 Overall design block diagram

手势动作捕捉系统使用 MEMS 惯性传感器，实现对关节运动信息的感应获取，并且手势动作捕捉系统因需要实时采集手势数据，因此设计成可穿戴设备，佩戴在人手上进行数据采集。仿人机械手可在实验者准入操作前根据人脸识别系统判断操作者身份，并采集零位手

势，再通过可穿戴式的手势动作捕捉系统采集手指和手臂姿态信息，并解算其手势姿态数据传输至仿人手机械手主控制系统中，转换为电机的旋转角度，实现机械手的无线远程控制。

该系统包含人脸识别和动作捕捉两套传感器，将机械手无线远程控制内容分解为：

- (1) 机械手的实时随动功能；
- (2) 机械手根据初始设定手势，按照规定动作执行的功能；
- (3) 手势录入功能；

以此细化仿人机械手臂姿态的远程同步控制任务，代替人从事存在生产安全隐患的工作。

随动机械手系统是通过研究和分析人手的生理结构特征，总结当前仿人机械手的设计方法，设计一种通用型关节式随动机械手，并且对机械手模型进行运动学仿真，确认仿人随动机械手拥有合理的机械结构；仿人随动机械手通过舵机驱动，带动手腕手指等关节运动，仿人机械手随动系统框图如图 2 所示。

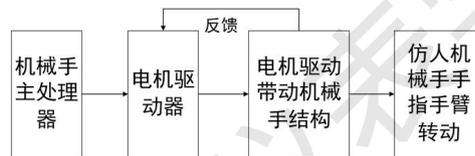


图 2 仿人机械手随动系统框图

Fig. 2 Block diagram of mechanical manipulator following system

## 3.2 设计方法

### 1. 手势动作捕捉系统的设计

手势动作捕捉系统因需要设计成可穿戴设备，所以对体积有着较高的要求，需要将微机械惯性传感器、通信模块、处理器和电源模块集成到同一个电路板中。系统的具体硬件组成主要包括五个模块：主控模块、动作捕捉模块、蓝牙模块、人脸识别模块和电源模块。手势动作捕捉系统框图如图 3 所示，在系统工作过程中五个模块分别承担不同的任务，从而可以有效地完成对手部姿态数据的采集、处理和传输。在本次系统中的主控模块使用了 STM32F103C8T6 最小系统板，其是整个系统的核心处理模块，能够完成对姿态检测模块所采集到的加速度和角速度数据的接收和处理，并完成对当前姿态角的计算，随后主控模块将信息整合，转化成对应舵机参数后按照制定好的通讯协议，通过蓝牙发送至随动机械手系统。电源采用锂电池供电，额定电压 7.4V，再通过稳压模块降至 5V 使用。

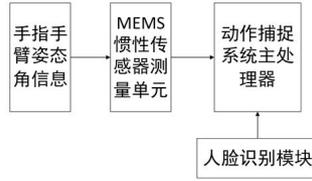


图3 手势动作捕捉系统框图

Fig. 3 Motion capture system block diagram

手势动作捕捉系统的人脸识别模块以 K210 为人脸图像识别的核心芯片，同时加入语音模块、触摸屏和 RFID 模块。语音模块和触摸屏组成了系统人机交互部分，系统界面简洁操作简单，同时具备语音播报功能。

人脸识别模块由最小系统板 STM32F103C8T6 构成的主控模块控制。主控模块引出了所有的 IO 口便于使用，同时该主控模块拥有 3.3V 超低功耗的 LDO 稳压芯片，从而可以有效地保证供电的稳定性，主控模块电路如图 4 所示。

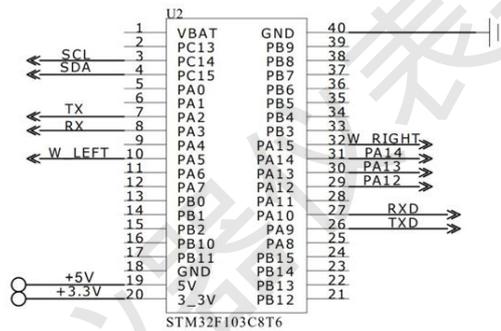


图4 主控模块电路图

Fig. 4 Core circuit diagram of module

当按下人脸识别启动按键，摄像头录入操作者人脸，与实验操作前存储的人脸信息进行对比如面部特征相匹配，则解锁仿人机械手，同时显示录入的编号，现场实验如图 5 所示。



图5 人脸识别模块实验

Fig. 5 Face recognition module experiment

手势动作捕捉系统的动作捕捉模块分为关节姿态角检测和手指弯曲度检测，其中关节姿态角检测采用以 MPU6050 加速度计为核心的六轴姿态角度传感器，其内部集成了数字运动处理器 DMP，在使用过程中具有非常高的精度并且能够很好的完成对数据的检测和初步

处理。

手势动作捕捉系统通过六轴姿态角度传感器实时采集手臂的姿态信息，确定运动过程中各节点在三维空间中的位置，数字运动处理器 DMP 接收并处理数据，处理结果从寄存器读出，并使用传感器的一个外部引脚产生中断，主控模块在接收到中断后进行信息读取，同时将手臂的姿态信息实时无线传输至随动机械手控制系统。六轴姿态角度传感器电路设计如图 6 所示。

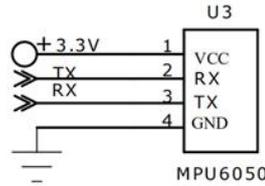


图 6 六轴姿态角度传感器电路

Fig. 6 Six-axis attitude angle sensor circuit

手指弯曲度检测采用电阻式的弯曲传感器，当手指弯曲时其电阻值会随着其手指弯曲形变信息发生改变，弯曲的程度越大的情况下，其阻值就会相应的越大，反之就会越小，利用此特性可以检测人手指的弯曲程度。手指弯曲度检测模块电路如图 7 所示。

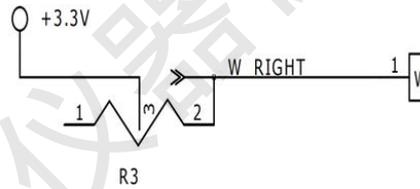


图 7 手指弯曲度检测模块电路

Fig. 7 Finger flexure detection module circuit

鉴于手势动作捕捉系统的穿戴性，不便于采用有线通信的特点，因此在手势动作捕捉系统和随动机械手系统之间采用蓝牙进行通信，蓝牙可实现在固定设备和移动设备之间的短距离数据交换。本次选用 HC-05 主从机一体蓝牙模块，使用蓝牙通讯技术进行手势动作捕捉系统和随动机械手系统之间的信息交互，手势动作捕捉系统通过特定的帧格式，将电机转动角度信息通过蓝牙发送给随动机械手系统，随动机械手系统接受到数据后进行数据奇校验，校验成功的数据才会被电机执行。蓝牙模块电路如图 8 所示。

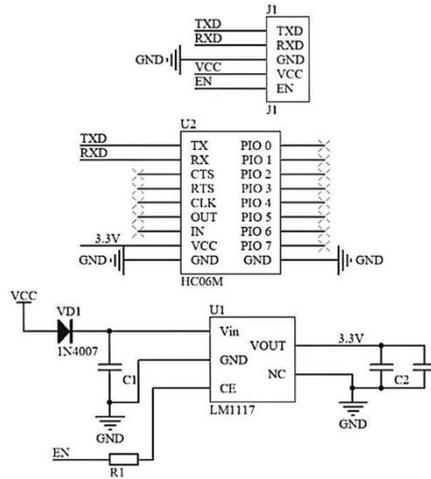


图 8 蓝牙模块电路

Fig.8 Bluetooth module circuit

## 2. 随动机械手系统的设计

随动机械手系统需要完成模仿人手动作的功能，因此需要设计成类似人手的结构，其硬件设计主要包括：主控模块、蓝牙模块、电源模块、舵机模块以及机械结构设计。蓝牙模块同样采用 HC-05 模块，但需设置成从模式与手势动作捕捉系统的蓝牙主机进行配对。

结合人手的结构特点，从人手最基本的运动方式出发，将人手的运动划分为 5 种运动方式，食指、中指、无名指、小指的伸展与弯曲以及拇指的自由运动。人手模型如图 9 所示。

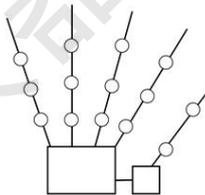


图 9 人手模型

Fig.9 Model of Human hand

机械结构由大臂俯仰关节、小臂俯仰关节、腕部俯仰关节以及手指这四个俯仰关节构成；其中手指中的拇指拥有 2 个关节以及 2 个转动副，其余 4 指每指均包括 3 个关节，每个关节配 1 个转动副，每根手指分别由 1 根鱼线连接，各个部位设计了用于固定鱼线的凹槽，为了保证各个手指在运动时互不干涉，在各个手指关节的部分采用合适尺寸的切除。机械手装配图设计如下图 10 所示。

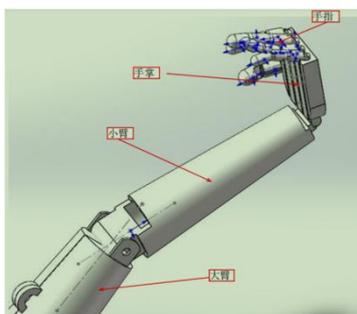


图 10 机械手装配图

Fig.10 Mechanical hand assembly

图 10 中的大拇指是 2 自由度，其余 4 指是 3 自由度，5 指配合，协调工作。橡皮筋为每个手指关节之间提供回复力，指根关节是主动关节，由 1 个舵机驱动，随着舵机转动，使手指做出期望的动作。每个关节的橡皮筋与机械连接所形成的限位，使指节在没有外力的作用下，保持 2（3）指节在一条直线上，限制手指在一定区域内运动，使其不产生多余的动作。每个手指分别由一个独立的舵机控制。这种设计不仅在结构上和装配上得到简化，同时在执行手指的抓、握、捏动作时，更柔软、轻巧，并且能够完成比较复杂的动作，通过 3D 打印完成仿人机械手的实物制作如图 11 所示。

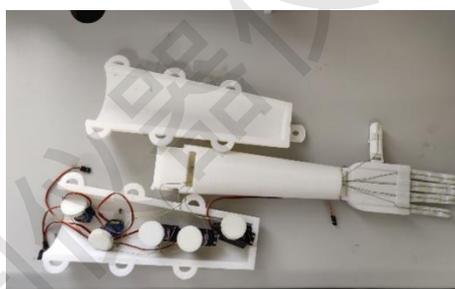


图 11 3D 打印实物图

Fig.11 3D Print a physical drawing

舵机模块主要由两个部分组成，一是控制电路，其主要作用是驱动和控制伺服电机工作；二是减速齿轮组。另外，舵机在实际工作过程中会将电机的三环控制进行转化，使其只在位置环控制，也就是从三环降为了一环控制。舵机模块所使用的位置环其本质上就是一个电位器，在舵机发生转动的过程中，其阻值也会随之产生相应的变化，在使用过程中能够很好的完成对舵机转角的确定，因为只需要完成对位置环阻值的测定既可。基于舵机的如上特点，本设计利用舵机来控制机械手关节的运动。其控制电路图如图 12 所示，舵机驱动模块实物图如图 13 所示。

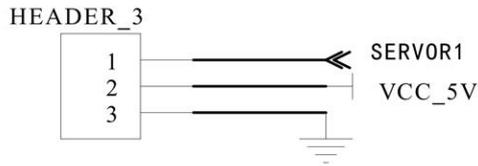


图 12 舵机控制电路图

Fig. 12 Servo Control Circuit Diagram

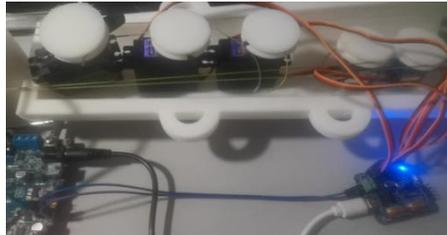


图 13 舵机驱动模块实物图

Fig. 13 Servo drive module physical diagram

### 3.3 实验验证过程

根据仿人机械手的设计方案和目标，画出仿人机械手功能初始化流程图，如图 14 所示。

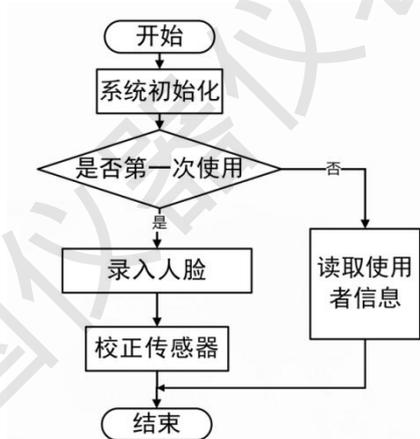


图 14 任务应用的结构框图

Fig. 14 Structural block diagram of task application

仿人机械手在实验者操作之前先进行系统初始化，人脸识别系统判断操作者是否是第一次使用，若是第一次使用，则需先录入人脸信息，并根据语音指令将手指平放进行采集零位角度，以此校正传感器。这样可以减小因不同操作者手掌大小以及采集基准不同而产生的误差，提高仿人机械手的精度，识别操作者并校正传感器之后，会执行相应的任务。若不是第一次使用，则直接验证操作者身份，操作者身份识别成功后，执行相应的任务。

手势动作捕捉系统的主控模块通过惯性传感器在实时采集手势姿态数据后，将姿态数据转换为机械手驱动电机的旋转角度，再通过蓝牙传输给随动机械手系统，随动机械手系统的

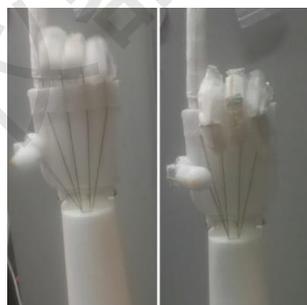
主控模块控制舵机旋转以实现机械手的实时随动。时间计算以 5ms 中断为基，小于 5ms 按 5ms 计算，电机反应时间为从 PWM 信号加载舵机到编码器接收到舵机信号的时间，数据如表 1。

**表 1 电机的反应速度和数据包计算时间**

**sheet.1 Statistics of motor response speed and packet calculation time in following mode**

反应速度 实验次数	计算 数据包	电机 1 反应时间	电机 2 反应时间	电机 3 反应时间
1	5	40	50	45
2	5	45	35	45
3	5	35	45	40
4	5	40	40	50
5	5	40	40	45
6	5	50	35	35
7	5	35	45	50

在完成校正传感器之后，机械手按照规定的任务执行动作。例如，机械手完成手势“二”、“五”，手势“抓”、“握”等实际操作。如图 15 所示。



**图 15 抓握手势实现**

**Fig.15 Grasp and shake the posture to achieve**

在完成校正传感器之后，根据系统的语音提示“开始录入既定手势”，系统将在规定时间内按照一定采样率采集使用者的手势信息，录入结束后，系统将信息存入内部 Flash 中，以便后续使用。时间计算以 3ms 中断为基，小于 3ms 按 3ms 计算，电机反应时间为从 PWM 信号加载电机到编码器接收到电机信号的时间。如图 16 所示。实验结果表明机械手识别准确率达到 90%以上，反应速度稳定在 30~50ms。

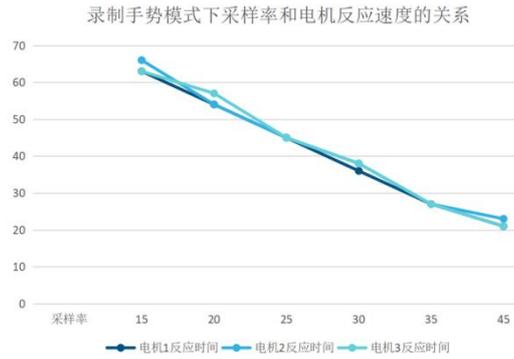


图 16 采样率和电机反应速度的关系

Fig.16 The relationship between sampling rate and motor reaction speed

#### 参考文献:

- [1] Liu Y, Jiang D, Tao B, et al. Grasping posture of humanoid manipulator based on target shape analysis and force closure[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(5): 3959-3969.
- [2] Yin M, Shang D, Huang B, et al. Modeling and control strategy of flexible joint servo system in humanoid manipulator driven by tendon-sheath[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(5): 2585-2595.
- [3] 王善德.基于惯性传感器的智能手环手势识别系统[D].吉林:吉林大学,2016.
- [4] Wang W Wu Y , Zheng J , et al. A Comprehensive Framework for the Design of Modular Robo-tic Mobile Fulfillment Systems[J]. IEEE Access, 2020, 8(99): 13259-13269.
- [5] 叶素芬, 赖际舟, 吕品, 等. 穿戴式钢琴弹奏手套智能感知与手势识别技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 187-194.
- [6] Prattichizzo D, Malvezzi M, Gabbicini M, et al. On motion and force controllability of precision grasps with hands actuated by soft synergies[J]. IEEE transactions on robotics, 2013, 29(6): 1440-1456.
- [7] Radford N A, Strawser P, Hambuchen K, et al. Valkyrie: Nasa's first bipedal humanoid robot[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(3): 397-419.
- [8] 李剑锋,张玉茹,张启先.多指手的操作灵巧性设计 [J]. 机械工程学报,2000, 7(11):23-29.
- [9] Saudabayev A, Varol H A. Sensors for robotic hands: A survey of state of the art[J]. IEEE Access, 2015, 3: 1765-1782.
- [10] Misra A, Sharma A, Singh G, et al. Design and development of a low-cost CNC alternative SCARA robotic arm[J]. Procedia Computer Science, 2020, 171: 2459-2468.

- [11] Coronel-Escamilla A, Torres F, Gómez-Aguilar J F, et al. On the trajectory tracking control for an SCARA robot manipulator in a fractional model driven by induction motors with PSO tuning[J]. *Multibody System Dynamics*, 2018, 43(3): 257-277.
- [12] 刘春花. 基于可穿戴控制器的手势识别技术研究[D].哈尔滨理工大学,2017.
- [13] 宁志超. 基于 ATmega16 的六自由度果实采摘机械手控制系统的设计[D].东北农业大学,2010.
- [14] 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].西安电子科技大学,2019.
- [15] S Mary Vasanthi, T Jayasree. Vasanthi S M, Jayasree T. Performance evaluation of pattern recognition networks using electromyography signal and time-domain features for the classification of hand gestures[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2020, 234(6): 639-648.