

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413031

一种基于光纤光栅传感器的机械手远程操控手套*

朱云鸿^{1,3,4}, 张旭², 娄小平^{1,3,4}, 董明利^{1,3,4}, 祝连庆^{1,3,4}

(1. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192; 2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 3. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016; 4. 广州南沙光子感知技术研究院 广州 511462)

摘要: 由于远程操控的机械手具有灵活性大和环境适应性高的特点,在越来越多的特殊场合下,人类开始借助机械手完成任务。本文针对危险环境中机械手高精度远程操作的需求,提出了一种基于光纤光栅传感器的机械手远程操控手套。建立了手套中光纤光栅传感器的弯曲测量模型,发现光纤光栅的中心波长变化量与弯曲角度之间成正比关系。结合机械手舵机的控制,提出了利用光纤光栅传感器进行机械手远程操控方法,编写了上位机软件,实现了从光纤光栅中心波长到手指弯曲角度最后到机械手舵机控制编码的过程。完成了光纤光栅传感器的设计和封装,手套的四路探测光纤中共有12个栅区长度为10 mm的光纤光栅传感器,其中11个传感器被封装在人手关节的上方进行弯曲感知,1个光纤光栅温度传感器用于温度补偿,利用704硅橡胶对光纤光栅传感器进行封装。搭建了基于光纤光栅传感器的机械手远程操控系统,并对光纤光栅传感器进行了标定,实验结果表明在人手关节弯曲 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的范围内,平均弯曲角度测量误差为 1.147° ,所有拟合直线的决定系数均大于0.993,最后设计了人机交互演示模块展示人手的运动。本文提出的基于光纤光栅传感器的手套具有小型化、高精度、抗电磁干扰的特点,在航天器在轨维修、远程医疗手术和高危排雷作业等方面具有潜在的应用前景。

关键词: 光纤光栅传感器;机械手远程操控;人机交互;弯曲角度

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

An FBG sensor-based glove for remote operation of manipulator

Zhu Yunhong^{1,3,4}, Zhang Xu², Lou Xiaoping^{1,3,4}, Dong Mingli^{1,3,4}, Zhu Lianqing^{1,3,4}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 4. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, China)

Abstract: Due to the high flexibility and environmental adaptability of remote-operational manipulators, they are increasingly used to complete tasks in special situations. An FBG sensor-based glove for the remote operation of manipulator is proposed to meet the demand for high-precision remote operation of manipulator in hazardous environments. A bending measurement model of fiber Bragg grating sensors in gloves is established. The central wavelength variation of fiber Bragg grating sensor is found to be directly proportional to the bending angle. Combined with the control of the manipulator servo, a method for remote operation of manipulator using fiber Bragg grating sensors is proposed. The upper computer software is developed. The process from the center wavelength of the fiber Bragg grating to the bending angle of the finger, and finally to the controlled encoding of the manipulator servo is implemented. The design and packaging of the fiber Bragg grating sensors are completed. There are a total of 12 FBG sensors with a length of 10 mm in the four detection fibers of the gloves. Among them, 11 FBG sensors are deployed above the finger joints for bending sensing, and 1 FBG temperature sensor is used for temperature compensation. The FBG sensors are packaged with 704 silicone rubber. A remote operation

收稿日期:2024-07-10 Received Date: 2024-07-10

* 基金项目:北京学者计划研究项目(BJXZ2021-012-00046)资助

system for the manipulator based on fiber Bragg grating sensors is built, and the fiber Bragg grating sensors are calibrated. The experimental results showed that the average bending angle error was 1.147° within the range of $0^\circ \sim 90^\circ$ bending of the human hand joint. The determination coefficients of all fitted lines are greater than 0.993. Finally, a human-computer interaction demonstration module is designed to display the movement of the human hand. The glove based on fiber Bragg grating sensors proposed in this article has the characteristics of miniaturization, high precision, and resistance to electromagnetic interference. It has potential applications in spacecraft in orbit maintenance, remote medical surgery, high-risk mine clearance operations, and so on.

Keywords: FBG sensor; remote operation of manipulator; human-computer interaction; bend angle

0 引言

随着机器人技术的快速发展,各种类型的机器人在各行各业有了更广泛的应用,特别是远程操控机械手的使用对于完成高精度操作和危险任务是必不可少的^[1]。远程操控的机械手是人手的一种延伸,可以让机械手像人手一样的灵活,由于机械手的灵活性和环境适应性高的特点,在越来越多的特殊场合下,人类开始借助机械手完成任务,例如在太空中维修航天器^[2]、远程进行医疗手术^[3-4]、高危险性精细化排雷作业^[5]、废墟搜救^[6]、远程操作电子设备^[7]等。

常见的实现机械手远程操控的方法有3种。第1种是基于视觉的方法去识别人手的手势,即利用相机对手进行视觉检测。2022年龙樟等^[8]提出了一种基于视觉手势识别的移动机器人手势控制系统,他们采用视觉相机识别手势,进而控制移动机器人。这种方法的缺点是不能够有视线遮挡,且当视觉相机与人手距离过远时会识别不到。

第2种方法是利用基于加速度计、压敏电阻或电容传感器的检测设备识别人手的手势。2020年Zhou等^[9]提出了一种基于纱线电阻测量的可拉伸传感器阵列,它具有高灵敏度和快速响应时间,用于将手语实时翻译成口语。2017年孟令达等^[10]设计了一款基于弯曲电阻传感器的无线体感仿生机械手,通过测量电阻上的电压变化,将其转变为舵机转动角度数据,然后发送给机械手,使之完成相应动作。这种方法的缺点是传感器可能存在刚性模块,体积较大,容易受到电磁干扰,且对外有电磁辐射。

第3种方法是基于光纤传感器的人手手势识别检测设备。这种方法的优点是光纤传感器是柔性材料,而且体积较小,电磁兼容性较好^[11]。基于光纤传感器的方法又可以分为两种,一种是基于光纤弯曲损耗检测光强的方法,另一种是基于光纤光栅传感器的检测方法。Majeau等^[12]利用发光二极管、光纤和光电探测器搭建了一套基于光纤弯曲损耗的低成本的感知手套,测量弯曲角度的精度为 5° 。Fujiwara等^[13]开发了一套基于柔性微弯曲光纤的手套,弯曲角度的测量精度为 4° 。他们还根

据光强与手指关节之间的相关性,采用基于反向传播架构的人工神经网络进行系统标定^[14-15]。基于光纤弯曲损耗检测光强的方法的缺点是光强与弯曲角度线性度不佳,需要神经网络解决非线性问题,且需要进行双端测量。

光纤光栅传感器是通过检测光纤光栅反射谱的中心波长实现传感的,相比与光强检测方法,它的抗干扰能力强,不易受光源光功率波动的影响^[16]。Silva等^[17]开发了一种基于光纤光栅传感器的可穿戴传感手套,实验表明光纤光栅传感器的响应与手指的弯曲呈线性关系,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内最大角度测量误差为 2° 。Jang等^[18]开发了一种基于光纤光栅传感器的新型手指运动捕获系统,它既可以感知手掌形状,也可以感知手指弯曲角度。Jha等^[19]提出了一种基于光纤光栅传感器的柔性传感手套,与惯性测量传感器的测量结果有很好的 consistency,决定系数为0.9985,最大角度测量误差为 1.42° 。

本文提出了一种基于光纤光栅传感器的机械手远程操控手套,建立了手套中光纤光栅传感器的弯曲测量模型,提出了机械手远程操控方法。该手套的四路探测光纤中有11个光纤光栅传感器被封装在人手关节的上方进行弯曲感知,有1个光纤光栅温度传感器用来补偿温度误差。标定后的光纤光栅传感器可精确测量人手关节的弯曲角度,该手套具有小型化、高精度、抗电磁干扰的特点,可用于航天器在轨维修、废墟搜救和远程操作电子设备等场景。

1 理论分析

1.1 光纤光栅传感器弯曲测量原理

光纤光栅传感器的光栅周期和折射率对外界环境参数具有敏感特性,当外界环境中应变和温度发生变化时,光纤光栅的折射率和光栅周期会发生变化,从而导致光纤光栅的反射光谱和透射光谱发生变化,因此通过检测光纤光栅的中心波长漂移量即可实现对外界环境的感知。

根据光纤耦合模理论,光纤光栅中心波长与光栅有效折射率和光栅周期的关系式为:

$$\lambda_B = 2 \times n_{eff} \times \Lambda \quad (1)$$

其中, λ_B 为光纤光栅的中心波长, n_{eff} 为光栅的有效折射率, Λ 为光栅周期。光纤光栅的中心波长随光栅周期和有效折射率的改变而发生变化, 应变和温度是能够引起光栅周期和有效折射率变化的最直接和最主要的因素, 光纤光栅的中心波长变化可以表示为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda - \lambda_B \quad (2)$$

其中, λ_B 为光纤光栅的初始中心波长, λ 为受外界环境影响后的中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为中心波长的变化量。当光纤光栅受到应变影响时, 中心波长会发生变化, 应变 ε 可以表示为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \times (1 - P_e)} \quad (3)$$

其中, P_e 为光纤的有效弹光系数, 一般取为 0.22。机械手远程操控手套中光纤光栅传感器的弯曲测量模型如图 1 所示。将光纤布设在伸直状态的手指上, 手指厚度为 h , 光纤距离手指上表面的距离为 d , 光纤光栅传感器的长度为 L , 且位于手指关节的正上方。

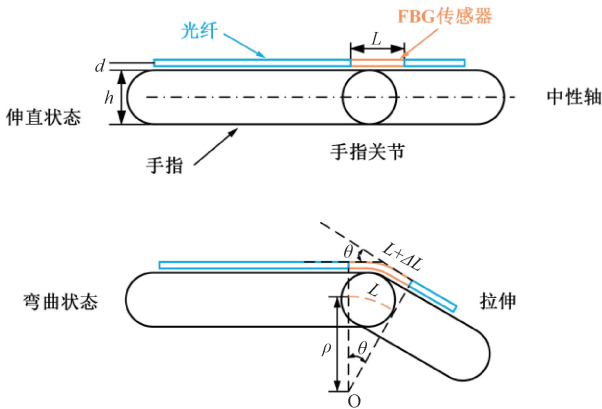


图 1 手套中光纤光栅传感器弯曲测量模型

Fig. 1 The bending measurement model of FBG sensor in the glove

当手指的关节产生弯曲时, 光纤光栅传感器受到拉伸, 长度伸长为 $L + \Delta L$ 。长度与弯曲角度之间的关系可以表示为:

$$L = \rho \times \theta \quad (4)$$

$$L + \Delta L = \left(\rho + d + \frac{h}{2} \right) \times \theta \quad (5)$$

其中, θ 为手指关节的弯曲角度, 也是弯曲圆弧对应的圆心角, 弯曲圆弧的圆心为 O 点, ρ 为曲率半径。推导可得弯曲后的应变 ε , 应变 ε 可以表示为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\left(d + \frac{h}{2} \right)}{\rho} = \frac{\left(d + \frac{h}{2} \right)}{L} \times \theta \quad (6)$$

由此可见, 光纤的应变与弯曲角度之间成正比关系。

结合应变与光纤光栅中心波长之间的关系, 弯曲角度可以表示为:

$$\theta = \frac{L}{\left(d + \frac{h}{2} \right) \times \lambda_B \times (1 - P_e)} \times \Delta\lambda_B \quad (7)$$

因此, 当光纤光栅的初始中心波长和有效弹光系数为固定值时, 光纤光栅的中心波长变化量与弯曲角度之间也成正比关系。在实际实验中, 可标定出弯曲角度与中心波长变化量之间的斜率系数和截距系数, 可以表示为:

$$\theta = k \times \Delta\lambda_B + b \quad (8)$$

其中, k 为斜率系数, b 为截距系数。

1.2 机械手的舵机控制方法

机械手的组成示意图如图 2 所示, 机械手由底座、控制器、舵机、手指弯曲机构和手腕弯曲机构组成。底座由 4 个真空吸盘支撑, 保证机构的稳定性。手指弯曲机构由微型舵机控制。控制器位于机械手的下方, 用于与计算机之间进行通信, 并控制舵机的转动, 它带有过流保护装置, 可以保护舵机。

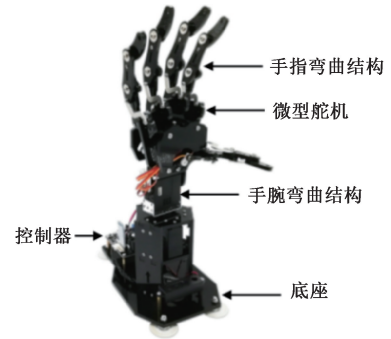


图 2 机械手的组成示意图

Fig. 2 Diagram of the composition of the manipulator

计算机与机械手之间通过 USB 数据线进行连接, 它们之间的通信方式是串口通信, 串口采用的是 TTL 电平, 波特率为 115 200 bps, 有 8 位数据位和 1 位停止位, 无校验位。舵机的伺服系统由可变宽度的脉冲来进行控制, 舵机基准信号的周期为 20 ms, 脉冲宽度为 1 500 μ s, 这个基准信号定义的位置为中间位置, 即舵机转动 90° 的位置。而舵机控制信号的最小脉冲宽度为 500 μ s, 对应舵机转动 0° 的位置, 最大脉冲宽度为 2 500 μ s, 对应舵机转动 180° 的位置。舵机转动的角度由其控制信号的脉冲宽度决定, 可以由串口输出控制指令进行操纵。

机械手控制指令含义及示例如表 1 所示, 控制指令由控制舵机序号、控制舵机方式、舵机控制信号的脉冲宽度的大小、舵机执行命令时间、结束符组成。

表1 机械手控制指令含义及示例

Table 1 The meaning and example of control commands for the manipulator

控制指令	指令含义
示例	#IP1 500#2P900T100\r\n
#1	控制1号舵机
P	以位置方式控制舵机
1 500	表示舵机控制信号的脉冲宽度大小,可以确定舵机转动的位置,范围是500~2 500 μs ,对应舵机转动 $0^\circ\sim 180^\circ$ 。1 500 μs 对应转动 90° 。
#2	控制2号舵机
P	以位置方式控制舵机
900	900 μs 对应转动 36°
T100	执行时间,单位为ms,从当前的位置旋转到命令中的位置所需要的时间,即速度快慢,范围是100~9 999 ms。
\r\n	该条命令的结束符,也是一个转移字符,即回车符和换行符。
示例	#STOP\r\n
#STOP	停止当前所有动作
\r\n	该条命令的结束符

2 方法和模型

2.1 机械手远程操控手套中光纤光栅传感器的设计

手套中光纤光栅传感器设计为并联的四路探测光纤,这种空分复用方法可以提高系统的稳定性与可靠性,四路探测光纤的末端为FC/APC光纤接头,与光纤光栅解调仪的接口连接。四路探测光纤中有一路光纤通过 1×2 光纤耦合器分为两根光纤,分别感知大拇指和食指关节弯曲。在一根光纤中,串联的光纤光栅传感器有自身特有的中心波长,保证在同一跟光纤中不同光栅传感器的中心波长互不干扰,并且波长间距足够大,达到波分复用的目的。

机械手远程操控手套中光纤光栅传感器的设计如图3所示。前期实验发现手套在机械手远程操控场景下光栅传感器的中心波长的变化范围不会超过 $\pm 2\text{ nm}$,实验中选用中心波长间距为 10 nm 。一共有12个光纤光栅传感器,栅区长度均为 10 mm ,其中10个光纤光栅传感器布设在手指关节处,用来测量手指关节的弯曲,1个光纤光栅传感器布设在手腕上,用来测量手腕弯曲,这11个光纤光栅传感器的温度灵敏度系数为 $10\text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。1个光纤光栅传感器为温度传感器,温度灵敏度系数为 $28\text{ pm}/^\circ\text{C}$,用来补偿温度对其他光纤光栅传感器带来的温度误差。

对于相邻光纤光栅传感器之间的长度距离,采用实际测量人手指关节长度的方式来确定。人的5根手指中除大拇指外,每根手指的关节有3处,按照距离心脏从近到远分别为掌指关节、第2指间关节、第1指间关节。由

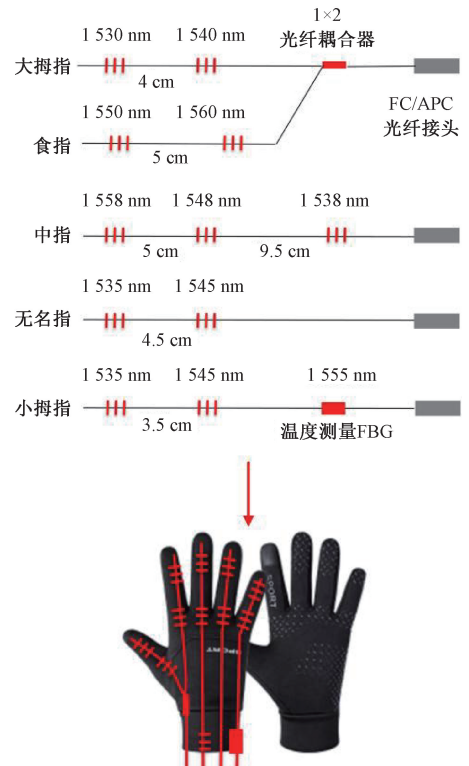


图3 手套中光纤光栅传感器的设计

Fig. 3 Design of FBG in the glove

于第1指间关节弯曲范围较小,且通常是随第2指间关节联动弯曲的,因此本文中将光纤光栅传感器布设在掌指关节(下关节)和第2指间关节(上关节)的上方。其中,大拇指的两个关节之间的距离为 4 cm ,食指的两个关节之间的距离为 5 cm ,中指的两个关节之间的距离为

5 cm,无名指的两个关节之间的距离为4.5 cm,小拇指的两个关节之间的距离为3.5 cm。手腕处中心波长为1 538 nm的光栅与中指下关节1 548 nm的光栅之间的距离为9.5 cm。

2.2 光纤光栅传感器的封装方法

为了保护光纤不受损坏,需要对光纤光栅传感器进行封装。机械手远程操控手套中光纤光栅传感器的封装工艺和封装示例如图4所示。首先,量出光纤光栅传感器到保护套管末端的长度,以确保光纤装入保护套管后,光纤光栅传感器处在手指关节弯曲的位置。然后在保护套管末端涂704硅橡胶,再使用注射器在保护套管的起始端吸气,将704硅橡胶吸入保护套管中,起到了封装保护作用。最后将胶水涂抹在手指关节弯曲位置的两端,将保护套管与手套固定牢靠。值得注意的是,不能在光纤光栅传感器处的保护套管涂抹胶水,否则保护套管会变硬,不能柔软地弯曲。

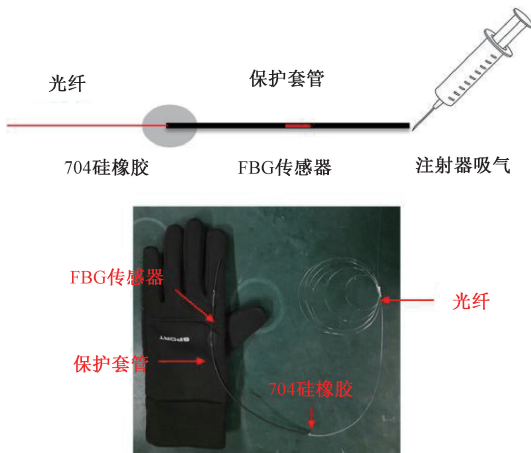


图4 手套中光纤光栅传感器的封装工艺和封装示例
Fig. 4 Packaging process and example of the FBG sensor in the glove

2.3 利用光纤光栅传感器进行机械手远程操控方法

利用光纤光栅传感器进行机械手远程操控方法流程图如图5所示。首先,保持手指和手套处于伸直的状态,记录光栅解调仪读出的所有的光纤光栅初始中心波长,以便计算每个光纤光栅传感器的波长变化量。然后,当手指和手套产生弯曲时,通过光纤光栅解调仪读出每个光纤光栅中心波长,计算出每个光纤光栅传感器的中心波长变化量。结合标定出的每个关节处的斜率系数 k 和截距系数 b ,可以得到每个手指关节的弯曲角度 θ 。

由于舵机控制信号的脉冲宽度的范围是500~2 500 μs ,对应舵机转动 $0^\circ\sim 180^\circ$,因此可以将关节的弯曲角度转换为机械手中舵机控制信号的脉冲宽度大小。根据前述的机械手控制指令,将舵机脉冲信号编

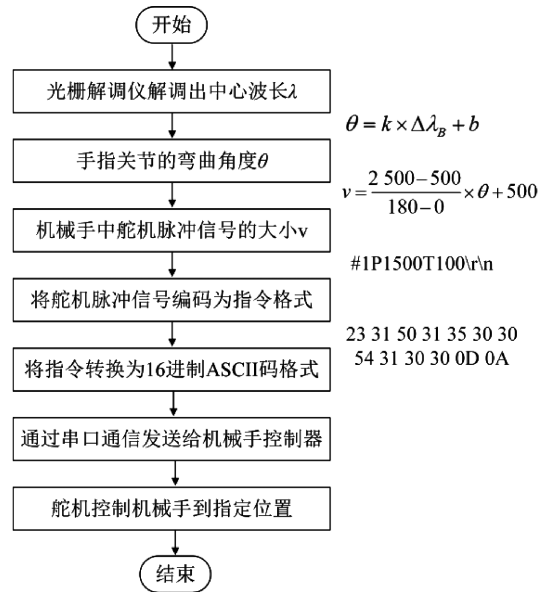


图5 利用光纤光栅传感器进行机械手远程操控方法流程图
Fig. 5 Flow chart of remote operation method for manipulator using FBG sensors

码为控制指令格式,将指令转换为16进制ASCII码格式,通过串口通信发送给机械手的控制器。最后,舵机控制机械手转动到指定位置。

3 实验和结果

3.1 基于光纤光栅传感器的机械手远程操控系统组成

基于光纤光栅传感器的机械手远程操控系统示意图如图6所示。该系统由光纤光栅解调仪、计算机、机械手、布设有光纤光栅传感器的手套组成。手套上的光纤光栅传感器连接在光纤光栅解调仪上,光纤光栅解调仪与计算机之间通过以太网线连接,光纤光栅解调仪有4个通道,解调范围为1 528~1 568 nm,解调频率为100 Hz。

计算机与机械手之间通过USB数据线连接,计算机中编写有上位机软件,上位机软件中含有传感与控制算法,可以读取光纤光栅解调仪解调出的中心波长数据,并最终输出机械手的控制指令,实现机械手的远程操控。此外,计算机中还编写了人机交互演示模块,可以更加直观地展示人手的运动情况。

3.2 光纤光栅传感器的标定实验和结果

由光纤光栅传感器弯曲测量模型可知,弯曲角度与光纤光栅的中心波长变化量之间成正比关系,搭建了光纤光栅传感器的标定实验系统,分别标定每个关节处弯曲角度与光纤光栅的中心波长变化量之间的关系。人手手腕的弯曲范围为 $0^\circ\sim 40^\circ$,每隔 5° 标定一个点,共标定8个点。人手手指关节的弯曲范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$,每隔 10°

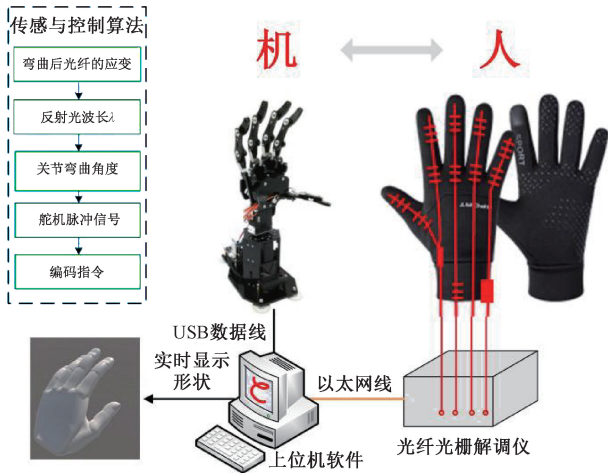


图 6 基于光纤光栅传感器的机械手远程操控系统示意图
Fig. 6 Diagram of the remote operation system of manipulator based on FBG sensors

标定一个点,共标定 9 个点。使用量角器测量关节的弯曲角度,量角器的量程为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$,分辨率为 1° 。在标定过程中,需要利用光纤光栅温度传感器的波长变化量计算出当前温度变化量,进而计算出温度变化导致测量用光纤光栅传感器的波长变化量,完成温度补偿。光纤光栅传感器弯曲测量标定结果如图 7 所示。

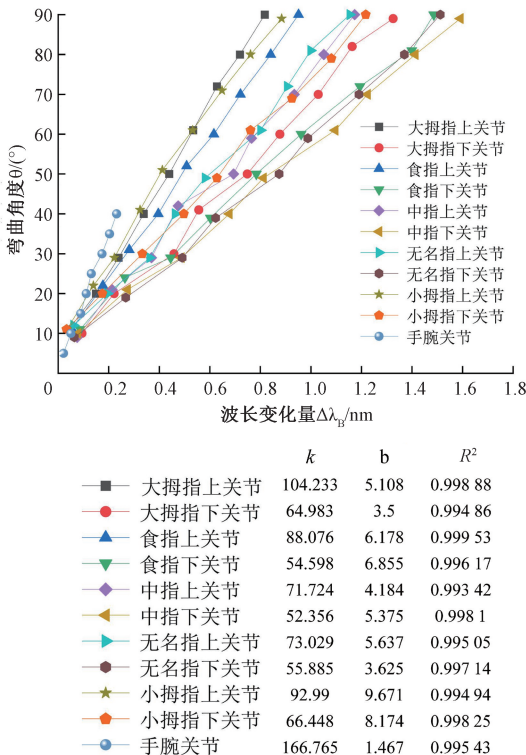


图 7 光纤光栅传感器弯曲测量标定结果
Fig. 7 Calibration results of FBG sensors in bending measurement

图 7 中纵坐标为人手关节的弯曲角度,横坐标为光纤光栅传感器经过温度补偿后的波长变化量,采用最小二乘法进行拟合,从实验结果可以看出,所有拟合直线的决定系数 R^2 均大于 0.993,表明拟合直线对数据的拟合效果较好。通过计算人手关节的实际弯曲角度与拟合直线之间的差值,即可以得到弯曲角度测量误差。在人手关节弯曲 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的范围内,平均弯曲角度测量误差为 1.147° 。手腕处光纤光栅传感器的斜率系数较大,为 $166.765^{\circ}/\text{nm}$,这是由于手腕处关节较大且手腕弯曲范围较小引起的,该拟合直线的决定系数 R^2 为 0.995 43。

为便于更加直观地展示人手的运动,设计了人机交互演示模块。人机交互演示模块主要分为模型设计与脚本控制两个方面。根据人手实际的骨骼与关节结构,对手进行了三维建模。人手模型的设计与建立如图 8 所示。手掌被设计为一个单独的块,手指的每一块骨骼被设计为单独的块,可以通过脚本控制来达到控制手指弯曲的目的。



图 8 人手模型的设计与建立
Fig. 8 Design and establishment of the human hand model

在标定好每个关节处的光纤光栅传感器的拟合直线后,当人手关节弯曲任意一个角度时,将光纤光栅传感器的波长变化量代入拟合直线中进行计算,就能得到弯曲角度值,进而发送给机械手的舵机进行远程操控。同样地,将得到的弯曲角度值发送给人机交互演示模块,即可完成手指弯曲运动显示。

基于光纤光栅传感器的机械手远程操控系统实物图如图 9 所示,在戴有光纤光栅传感手套的食指的上关节弯曲时,机械手的食指同步产生了弯曲,手指运动显示界面中的食指上关节也同步展示了一致的弯曲动作,整个系统的响应时间小于 1 s。



图9 基于光纤光栅传感器的机械手远程操控系统实物图

Fig.9 Physical image of the remote operation system of manipulator based on FBG sensors

4 结 论

本文针对机械手高精度远程操作的需求,开发了一种基于光纤光栅传感器的机械手远程操控手套,该手套的四路探测光纤中共有12个栅区长度为10 mm的光纤光栅传感器,其中11个传感器被封装在人手关节的上方进行弯曲感知,1个温度传感器用于温度补偿。建立了手套中光纤光栅传感器的弯曲测量模型,发现人手关节弯曲角度与光纤光栅的中心波长变化量之间成正比关系。通过标定实验得到每个传感器的斜率系数和截距系数。实验结果表明,所有拟合直线的决定系数均大于0.993,在人手关节弯曲 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的范围内,平均弯曲角度测量误差为 1.147° 。在未来的研究中,将建立更加符合人手关节运动的弯曲模型,并探索将光纤光栅传感器编织进手套中的方法,使机械手远程操控手套更好地服务于远程医疗手术、高危排雷作业、废墟搜救等场景中。

参考文献

[1] 雷歌,殷凤来. 智能机械手应用现状及关键技术研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(4): 133-134.
LEI G, YIN F L. Research on the status quo and key technologies of intelligent manipulator [J]. Wireless Internet Technology, 2019, 16(4): 133-134.

[2] 刘冬雨,刘宏,李志奇. 空间机械臂手系统在轨精细维修操作的标定策略[J]. 宇航学报, 2017, 38(6): 630-637.
LIU D Y, LIU H, LI ZH Q. Calibration strategy of space manipulator system on-orbit servicing fine operation [J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(6): 630-637.

[3] 易新华,钱晋武,张伦伟,等. 一种新型的内窥镜三维形状重构与定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(1): 55-60.
YI X H, QIAN J W, ZHANG L W, et al. New algorithm for 3D shape reconstruction and orientation of endoscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(1): 55-60.

[4] 沈林勇,肖海,钱晋武,等. 智能内窥镜的形状重建和可视化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2725-2730.
SHEN L Y, XIAO H, QIAN J W, et al. Shape reconstruction and visualization of intelligent endoscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(12): 2725-2730.

[5] FUJIWARA E, WU Y T, SANTOS M F M, et al. Development of an optical fiber transducer applied to the measurement of finger movements [C]. 22nd International Conference on Optical Fiber Sensor, 2012: 84212H.

[6] 邱亚,沈林勇,胡卫建,等. 缝隙搜救机器人镜体的形状重建和定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2782-2789.
QIU Y, SHEN L Y, HU W J, et al. Shape rebuilding and positioning method of search and rescue robot endoscope in ruin crack [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2782-2789.

[7] FUJIWARA E, WU Y T, MIYATAKE D Y, et al. Evaluation of thumb-operated directional pad functionalities on a glove-based optical fiber sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2330-2337.

[8] 龙樟,卢成娅,李国鹏,等. 视觉手势识别的机器人手势控制系统设计[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(8): 1247-1253.
LONG ZH, LU CH Y, LI G P, et al. Design on mobile robot gesture control system with visual gesture recognition [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(8): 1247-1253.

[9] ZHOU ZH H, CHEN K, LI X SH, et al. Sign-to-speech translation using machine-learning-assisted stretchable sensor arrays [J]. Nature Electronics, 2020, 3(9): 571-578.

[10] 孟令达,方俊杰,周雨. 无线体感仿生机械手[J]. 物联网技术, 2017, 7(7): 12-13.
MENG L D, FANG J J, ZHOU Y. Wireless somatosensory biomimetic robotic arm [J]. Internet of Things Technologies, 2017, 7(7): 12-13.

[11] ZHU Y H, JIN J, WANG X W, et al. An FBG sensor

- placement method to achieve long fatigue life and high measurement accuracy in deformation sensing of satellite solar panels[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(1): 318-328.
- [12] MAJEAU L, BORDUAS J, LORANGER S, et al. Dataglove for consumer applications [C]. 2011 7th International Workshop on Fibre and Optical Passive Components, 2011: 1-4.
- [13] FUJIWARA E, ONAGA C Y, DOS SANTOS M F M, et al. Design of a glove-based optical fiber sensor for applications in biomechanics[C]. 2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2014: 786-790.
- [14] FUJIWARA E, MIYATAKE D Y, DOS SANTOS M F M, et al. Development of a glove-based optical fiber sensor for applications in human-robot interaction [C]. 2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2013), 2013: 123-124.
- [15] FUJIWARA E, DOS SANTOS M F M, SUZUKI C K. Flexible optical fiber bending transducer for application in glove-based sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(10): 3631-3636.
- [16] ZHU Y H, JIN J, ZHANG D W, et al. Analysis of strain transfer in FBG-based embedded optical fiber 3-D shape sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(4): 3655-3665.
- [17] SILVA A F D, GONCALVES A F, MENDES P M, et al. FBG sensing glove for monitoring hand posture[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(10): 2442-2448.
- [18] JANG M, KIM J S, KANG K, et al. Towards finger motion capture system using FBG sensors[C]. 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2018: 3734-3737.

- [19] JHA C K, CHAKRABORTY A L. A fiber bragg grating strain sensor-based glove to accurately measure the bend angle of the finger flexed at the proximal interphalangeal joints[C]. 2018 IEEE Sensors, New Delhi, 2018: 563-566.

作者简介



朱云鸿,2017年于西北工业大学获得学士学位,2024年于北京航空航天大学获得博士学位,现为北京信息科技大学讲师,主要研究方向为光纤传感器和光电系统。

E-mail:zhuyunhong@buaa.edu.cn

Zhu Yunhong received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2017, received his Ph. D. degree from Beihang University in 2024. He is currently a lecturer at Beijing Information Science & Technology University. His main research interests include optical fiber sensor and optoelectronic systems.



祝连庆(通信作者),分别在1984年和1989年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位,2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为北京信息科技大学教授,主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail:lqzhu_bistu@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1984 and 1989, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes fiber sensing technology, fiber laser, and opto-electrical precision measurement technology.