

文章编号 1004-924X(2023)23-3414-12

光纤光栅波电转换的人机仿生跟随

王昊祥^{1,2}, 冯艳^{1,2*}, 潘睿智^{1,2}, 张洪溥^{1,2}, 周依霖^{1,2}, 熊根良^{1,2}, 张华^{1,2}

- (1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院 机器人研究所, 上海 201620;
2. 上海市大型构件智能制造机器人技术协同创新中心, 上海 201620)

摘要:为拓展光纤光栅在机器人智能感知领域的应用,设计了光纤光栅感知护具并研发了光纤光栅波电转换系统及其人机仿生跟随的交互操控算法。感知护具中设置有 3 个光纤布拉格光栅传感单元,主要包括弹性绳的拉力环。通过拉力环对光纤光栅施加预紧力,可有效避免由于衣物或皮肤聚集引起的牵引力方向偏移。光纤光栅波电转换系统对人体手臂的肘关节弯曲角度、腕关节俯仰角度、指关节开合角度进行运动姿态特征提取,分别对应控制机械臂的方向、高度和机械爪开合角度。构建了人体手臂运动角度范围和机械臂运动角度量程的对应关系,获取了检测系数和控制系数,最终通过动态实时波长与 PWM 控制电信号的转换推导出系统的波电转换系数。实验结果显示,在实验量程内,机械臂的方向、高度、开合控制输出的波电转换系数最大累积误差分别是 0.771 11%, 1.992 91%, 0.341 17%, 3 个控制角度的输出偏差分别为 1.135 60°, 1.720 56°, 1.826 57°。光纤光栅波电转换的仿生跟随方法具有良好的控制精度,实现了机械臂运动与人体手臂运动的仿生跟随,为智能机器人仿生跟随的深入研究奠定了理论基础。

关键词: 光纤布拉格光栅; 仿生跟随; 波电转换; 姿态特征

中图分类号: TN253; TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233123.3414

Bionic tracing of human and robotic arm based on FBG's wavelength-electric conversion

WANG Haoxiang^{1,2}, FENG Yan^{1,2*}, PAN Ruizhi^{1,2}, ZHANG Hongpu^{1,2}, ZHOU Yilin^{1,2},
XIONG Genliang^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2}

(1. Robotics Institute, School of Mechanical and Automotive Engineering,
Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Intelligent Manufacturing Robot Technology for
Large Components, Shanghai 201620, China)

* Corresponding author, E-mail: xmfy0833@sina.com

Abstract: To expand the application of fiber Bragg grating sensors in the field of robotic intelligent sensing, we have designed a novel FBG forearm sensing sheath. In this workstudy, a wavelength-electric conversion control system and the an algorithm forof human-computer bionic tracing were developed. There were three FBG sensing units including tension rings in the forearm sensing sheath. The tension rings made of spandex polyurethane fibers exerted a pre-tightening force on FBGs, which could effectively avoid the traction direction deviation caused by clothing or skin gathering. The joint movements caused the span-

收稿日期: 2023-07-05; 修订日期: 2023-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51665039); 上海市地方院校能力建设项目(No. 23010501600)

dex polyurethane fibers to drive the FBGs stretch or axial contraction axially and the wavelengths shift of FBGs' wavelengths shift. Thereafter, the wavelength-electric conversion control system transferred the motion posture features of human elbow bending angle α , wrist pitching angle β , and knuckle joint motion angle γ to the robot arm's direction θ , height φ , and mechanical claw opening and closing angle ψ , respectively. By deducing the relationship between the range of the human joint movement's range and the output range of the robot arm, the detection coefficient and the control coefficient were obtained. Then, the wavelength-electric conversion coefficient was deduced by converting the dynamic wavelength to the control electric signal in real-time. The experimental results demonstrate that this wavelength -electric conversion control system can make the robotic arm trace the human elbow bending, wrist pitching, and finger joint motion with good linear responses. Within the experimental range, the maximum cumulative error of wavelength-electric conversion coefficient of direction, height, and open/close control output are 0.771 11%, 1.992 91%, and 0.341 17%, and the deviation of three control angle outputs are 1.135 60°, 1.720 56°, and 1.826 57°, respectively. The wavelength -electric conversion control system has good control accuracy and it can make the robotic arm track human forearm movements. The research results can provide a theoretical basis to further develop the FBG sensing system of bionic tracing for the robotic arm.

Key words: optical fiber Bragg grating; bionic tracing; wave-electric conversion; posture feature

1 引 言

智能机器人在工业、医疗和日常生活中应用广泛^[1-4]。目前,随着智能机器人向着仿生机器人方向发展,仿生结构^[5]及仿生运动控制方面^[6-7]的研究得到了国内外学者的广泛关注。

在机器人控制方面,脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)的脉冲线性控制方法简单实用,是机器人运动控制的基础。晏益朋^[8]等提出一种基于离散时域模型的内外环控制参数多目标优化设计方法,实现了PWM控制电流内环控制参数对交流侧功率因数及电压外环控制参数对直流侧电压超调量的量化,提高了控制输出效果。张洁^[9]团队设计了一款纯数字电路实现的PWM波形生成器,可通过SPI接口进行参数配置,实现了可编程、方便控制等优点。史晓娟^[10]等采用STM32为控制核心,设计了可编程控制系统的硬件和软件,以LabVIEW为平台开发的监控中心能够远程监控系统的运行。吴凯^[11]团队设计了一套专用的海岸带履带机器人运动控制系统,同样基于Labview平台开发了上位机控制系统,下位机硬件则以STM32F407芯片作为控制核心。由此可知,基于PWM波的控制方法,结合Labview平台搭建上位机进行控制,可实现简单、可视

化的机械臂操控,用于人机交互控制。

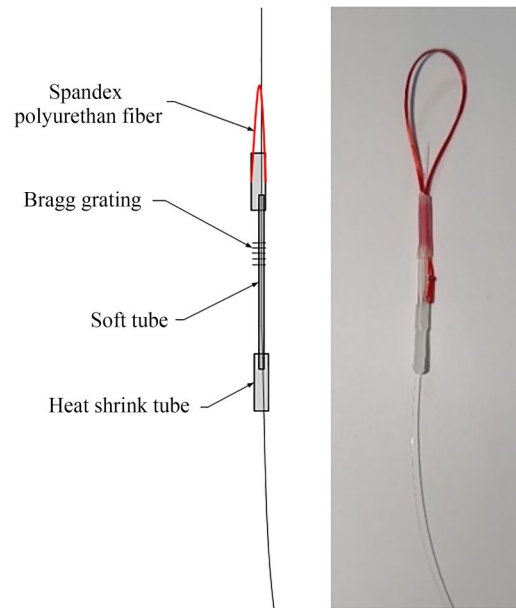
通过提取人体特征进行机器人运动的控制可以实现机器人远程仿生跟随操控,进而提高操作的安全性。Zhang^[12]等开发了一种离子水凝胶(PTSM)用在可穿戴方面,建立了基于手套的仿生人机交互(HMI)系统,实现了手势可视化和机器人手部控制的功能。卢思彤^[13]等设计了一种基于液态导电金属的柔性触觉力/应变感知纤维,柔软特性可以完全贴合手指,实现手指指尖触觉力和关节角度两个物理量的测量。然而,穿戴式凝胶等电信号的检测方式在强电磁环境中会出现误差。Ai^[14]等识别脑电信号并将结果映射到机械臂的控制指令中进行机械臂的多自由度控制,实现了人机交互,但脑电信号的卷积识别算法会使误差累加。赵雪^[15]从视觉角度出发进行仿生控制研究,设计了半自动化的交互技术。刘正雄等^[16]提出一种面向遥操作手眼协调的虚拟仿真场景交互控制方法。现有的仿生跟随采用视觉方法^[17-19]进行人体运动姿态检测和捕捉,会受到环境光线强度、传感器精度等的影响。郭永兴^[20]团队针对仿生扑翼的形变检测,将FBG以阵列的形式布设在扑翼表面监测翼面扑动的实时应变,成功监测了一个室内稳定扑动周期内翼面的应变变化。

光纤布拉格光栅传感器(Fiber Bragg Grating, FBG)具有体积小、易于集成、响应快和抗电磁干扰等特点,近年来广泛应用于工程结构健康监测、石油产业、电力行业、岩土工程、航空航天、采矿、爆破、交通及医学等领域^[21-23]。FBG易于集成在穿戴式智能感知装置上,在识别和提取人体运动特征参数方面具有很大的发展潜力,可应用于人机交互的仿生跟随运动。Li等^[24]将FBG插入硅胶管,针对光纤光栅波长变化和关节运动的关系进行研究,证明了波长与关节运动的线性关系。Thanit等^[25]在可拉伸织物中缝制了一支光纤光栅传感器,用于测量肘部弯曲运动,验证了支撑织物上FBG传感器的稳定性。该工作为光纤光栅应用于可穿戴设备提供了理论基础。2011年,DA SILVA等^[26]将FBG与手套相结合来检测手的伸展和弯曲,将传感栅区布置在关节弯曲处检测手部每个关节的变化,使传感织物可以独立地检测手指的弯曲。2020年,Zaltieri等^[27]将光纤光栅嵌入到硅橡胶中制成了可以穿戴在人体腰椎上的柔性传感单元,以检测久坐人群的坐姿和腰椎健康。可见,FBG传感在柔性穿戴式的人体运动姿态检测领域具有很大的发展潜力和应用前景。

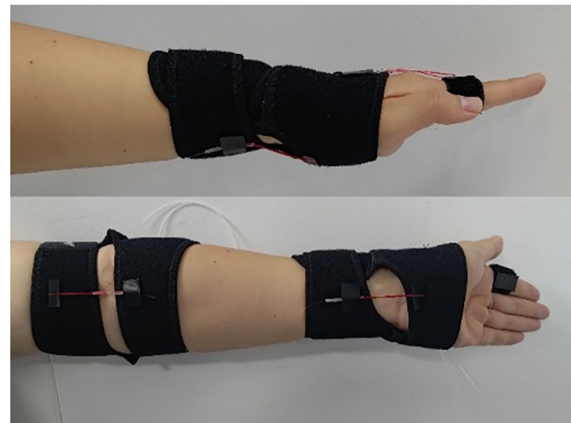
目前,FBG智能感知的波长信号与机器人控制电信号转换的研究还很少。本文设计了一种穿戴式FBG感知护具,主要研究了FBG中心波长与控制机械臂的PWM电信号之间的波电转换关系,并搭建了基于Labview平台的控制系统,实现了机械臂的仿生跟随。最终通过人体手臂运动姿态的特征提取,实现了机械臂运动的方向、高度、机械爪开合角度的仿生跟随控制,为FBG传感器应用于智能机器人的仿生跟随运动控制的深入研究提供理论支持。

2 光纤光栅感知护具

FBG是利用光纤材料的光敏特性制作的传感器。发生光照时,光纤的折射率随着光照强度的增大产生永久性增大,从而在纤芯中形成永久的空间相位光栅。实验采用环型设计将弹性绳与光纤光栅的两端尾纤对接,再用热缩软管将两端的弹性绳固定在光纤尾纤上,如图1(a)所示。采用预紧力方式将光纤光栅两端尾纤连接于关



(a) 光纤光栅感知单元
(a) FBG sensing unit



(b) 前臂运动姿态感知护具
(b) Forearm sensing sheath

图1 光纤光栅前臂关节运动姿态检测

Fig. 1 Forearm posture tracking using FBG

节检测面,有效避免了由于衣物或者皮肤聚集引起的牵引力方向偏移,如图1(b)所示。配有拉力环的光纤光栅在受到轴向拉力时中心波长会产生偏移。将光纤拉力环与护具粘贴带结合,把光纤光栅检测端的弹性环按照关节运动方向粘贴在关节运动处,关节运动将带动弹性绳产生轴向应变,进而把关节运动力传递给光纤光栅。

将 $FBG_i (i=1, 2, 3)$ 分别安置在人体上肢的肘关节、腕关节和手指关节处,跟踪肘部弯曲角 α ,腕关节俯仰角 β 和指关节开合角 γ ,分别对应

机械臂的方向角 θ 、高度角 φ 和机械爪开合角度 ψ 的控制。光纤拉力环传感穿戴效果及对应放置如图 1(b) 所示。

3 波长与 PWM 信号的波电转换原理

根据光纤光栅的耦合模理论,入射到光纤光栅的宽带光,只有满足布拉格条件的光才能被反射回来,其余波长的光都被透射,可以描述为^[28]:

$$\lambda_i = 2n_e \Lambda, \quad (1)$$

式中: λ_i 为 FBG_{*i*} 的中心波长, i 代表 FBG 的序号, n_e 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。其中,光栅周期和有效折射率受温度、应力等外界环境的影响,导致布拉格反射的中心波长发生偏移,这些变化可以表示为:

$$\Delta\lambda_i = 2n\Lambda \left\{ \left[1 - P_e \right] \epsilon + \left[\tau + \frac{dn}{n} \right] \Delta T \right\}, \quad (2)$$

其中: ϵ 为拉伸引起的纵向弹性应变效应系数; P_e 为有效弹光系数; τ 为热膨胀系数。当室内温度变化较小时,忽略温度的影响,化简式(2)可得:

$$\Delta\lambda_i = 2n\Lambda(1 - P_e)\epsilon. \quad (3)$$

以肘关节弯曲角度 α 检测为例,当人体肘关节弯曲时,在弹性绳伸长或缩短时,对 FBG 施加轴向应变 ϵ ,与关节运动变化角度成正比,即 $\epsilon = \Gamma \times \Delta l_1 = d_1 \Delta \alpha$,其中 Γ 为弹性绳劲度系数, d_1 为肘关节运动检测系数。标定量程时,记录检测 FBG_{*i*} 的实时波长为 λ_i ,标定初始波长和终止波长分别为 λ_{is} 和 λ_{ie} ,因此将角度变化和波长变化对应可得肘关节弯曲角度检测系数 d_1 ;同理,腕关节俯仰角度检测系数为 d_2 ,指关节开合角度检测系数为 d_3 ,分别如下:

$$\Delta\lambda_1 = \lambda_1 - \lambda_{1s} = 2n\Lambda(1 - p_e) \times \Gamma \times \Delta l_1 = d_1 \Delta \alpha, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_{2s} = 2n\Lambda(1 - p_e) \times \Gamma \times \Delta l_2 = d_2 \Delta \beta, \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_3 = \lambda_3 - \lambda_{3s} = 2n\Lambda(1 - p_e) \times \Gamma \times \Delta l_3 = d_3 \Delta \gamma. \quad (6)$$

下位机机械臂的控制采用 PWM 输出脉宽信号 s_i 来控制,通过改变 PWM 的脉宽占空比来改

变机械臂的运动状态。其中, $i = 1, 2, 3, 4$,分别对应机械臂方向角度 θ 、高度角 φ 、开合角度 ψ ,以及平衡角度 $\rho = (180^\circ - \varphi)$ 的控制,如图 2 所示。输出控制量程采用串口调试(XCOM)获得控制信号 s_i , Δs_i 表示机械臂 PWM 信号的终止角度控制信号 PWM_{*ei*} 与初始角度控制信号 PWM_{*si*} 的差值,即机械臂的运动量程,如下:

$$\text{PWM}_{e1} - \text{PWM}_{s1} = \Delta s_1 = \Delta \theta c_1, \quad (7)$$

$$\text{PWM}_{e2} - \text{PWM}_{s2} = \Delta s_2 = \Delta \varphi c_2, \quad (8)$$

$$\text{PWM}_{e3} - \text{PWM}_{s3} = \Delta s_3 = \Delta \psi c_3. \quad (9)$$

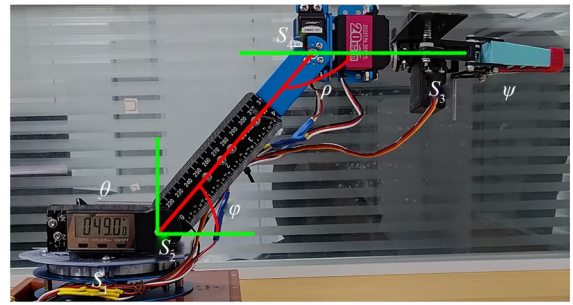


图 2 机械臂坐标示意图

Fig. 2 Schematic of robotic arm coordinate

由此可以推导出输出的控制量程 Δs_i 以及控制系数 c_i 。以机械臂方向控制信号输出为例,首先获取控制信号量程记录方向控制角度的 PWM_{*e1*} 和 PWM_{*s1*},由此可以得到方向控制系数 c_1 如下:

$$c_1 \Delta \lambda_1 = \Delta s_1 d_1. \quad (10)$$

当机械臂跟随人手肘弯曲运动时,满足 $\alpha = \theta$,机械臂方向波电转换系数 k_1 可表达为:

$$\Delta s_1 = \frac{c_1(\lambda_1 - \lambda_{1s})}{d_1} = k_1(\lambda_1 - \lambda_{1s}). \quad (11)$$

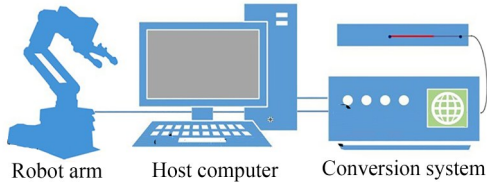
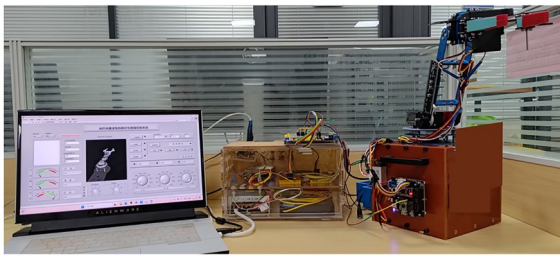
同理,机械臂高度波电转换系数 k_2 、机械爪开合角度波电转换系数 k_3 如下:

$$\Delta s_2 = \frac{c_2(\lambda_2 - \lambda_{2s})}{d_2} = k_2(\lambda_2 - \lambda_{2s}), \quad (12)$$

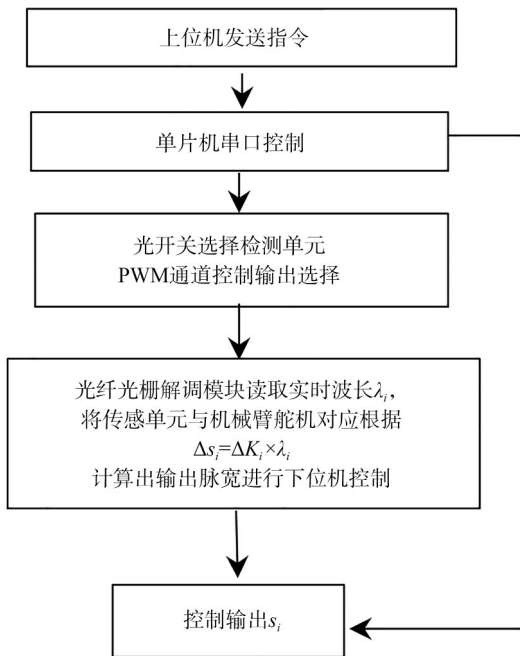
$$\Delta s_3 = \frac{c_3(\lambda_3 - \lambda_{3s})}{d_3} = k_3(\lambda_3 - \lambda_{3s}). \quad (13)$$

4 仿生跟随控制系统

系统的设计包括上位机控制、下位机机械臂和波电转换解调系统,如图 3(a) 所示。上位机发送指令给单片机进行光开关通道选择以获取对



(a) 实物图
(a) Photo of the system



(b) 流程示意图
(b) Process schematic

图 3 光纤光栅波电转换系统

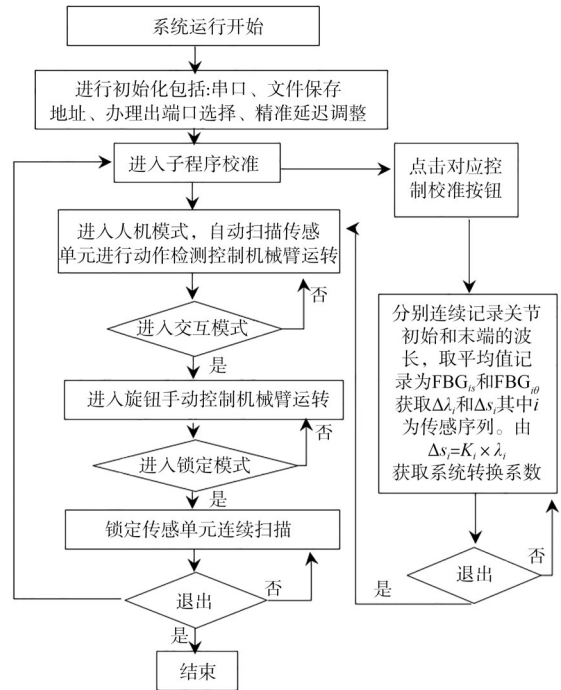
Fig. 3 Wavelength -electric conversion system

应 FBG_i 的中心波长。由获取到的检测量程 $\Delta\lambda_i$ 以及控制量程 Δs_i 进行初始化,由式(11)~式(13)分别得出波电转换系数 k_i 。

波电转换解调系统包括光开关(Sercalo, SW1×4-9N,用于 FBG_i 通道选择)和光源模块(ASE-CL-0-13-2)。当感知护具上的FBG中心波长发生变化时,反射光通过光开关进入解调模块。FBGA(Bayspec, 1510-1590-FP)解调模块

进行波长解析将分析返回的光进行中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 读取。解调到的光信号传递给上位机电脑,上位机对获取的信号处理实现波电转换。最后由上位机向单片机发送指令,进行光开关通道切换以获取 FBG_i 的中心波长以及控制信号 Δs_i 的对应输出,进而实现机械臂的姿态仿生跟随运动。系统流程如图 3(b)所示。

基于 Labview 平台搭建的上位机如图 4(b)所示,主要包括校准模块、模型追踪模块、信息显示模块、手动旋钮控制的交互模式,以及自动扫描关节运动的追踪人机模式。上位机操作如图 4(a)所示,首先进行初始化,包括 CH340 串口选择,数据存储, FBG_i 和机械臂舵机对应初始化。



(a) 上位机操作流程

(a) Host computer operation flow



(b) 上位机界面

(b) Host computer interface

图 4 上位机设计

Fig. 4 Design of host computer

点击不同模式按钮进行操作模式切换可以实现机械臂的不同控制方式,不仅可以进行关节扫描的人机模式控制,也可以用交互模式进行手动旋钮控制,还可以单独选择读取其中某个关节的运动进行追踪,操作流程如图4(a)所示。在启动操作后,上位机搭载的模型模块能够实时展示下位机机械臂的运动姿态。

5 实验数据分析

在室温 25 °C 下,实验分别采用中心波长 $\lambda_1=1\ 549.637\ 976\ \text{nm}$, $\lambda_2=1\ 549.787\ 455\ \text{nm}$, $\lambda_3=1\ 549.498\ 987\ \text{nm}$ 的 FBG 进行检测。常见的

FBG 检测人体关节运动多采用贴合运动关节处的方法,这样忽略了人体肌肉形态变化引起的横向形变,还会受到人体温度的影响。实验采用弹性拉力环预紧力方式:当关节发生运动时,FBG 传感器悬空于关节开合处。采用这种方式可以避免运动时衣物或者皮肤的聚集而改变受力方向,保证受力与角度运动的线性关系,同时也避免了 FBG 传感器与人体接触导致的温度误差。

为模拟人关节生理运动进行机械臂运动控制,通过检测肘关节的弯曲状态来控制机械臂的方向,手腕关节俯仰运动对应机械臂的高度控制,手指关节弯曲抓取动作控制机械爪的开合。关节角度测量过程如图5所示。

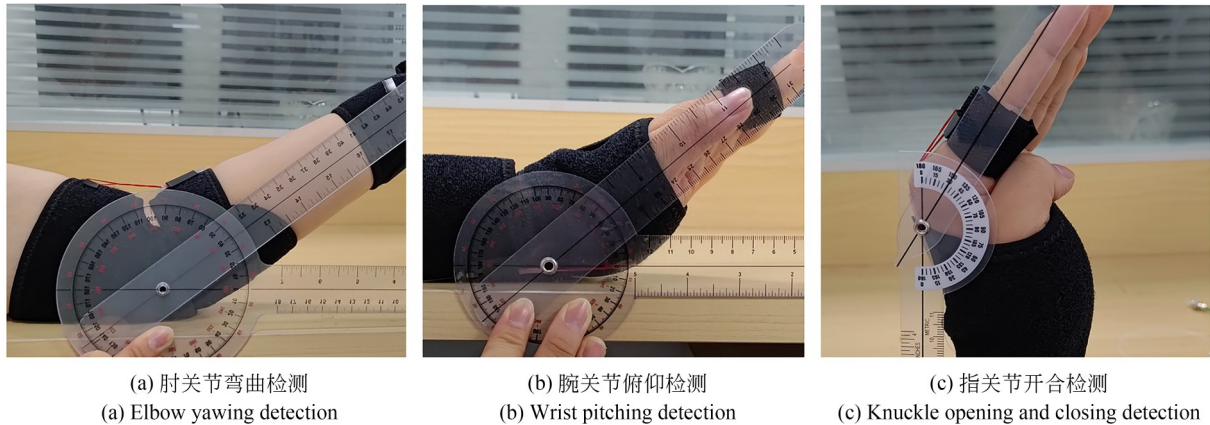


图5 姿态角度检测

Fig. 5 Detection of posture angle

5.1 方向控制

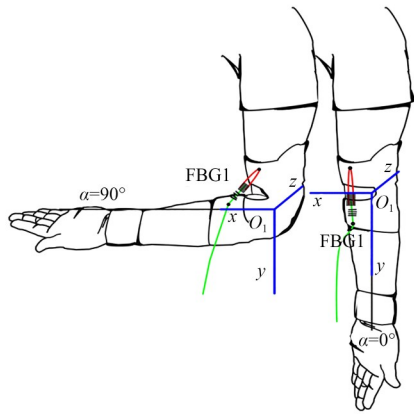
如图6(a)所示,实验采用FBG₁检测肘关节弯曲进行机械臂方向控制,分别记录肘关节弯曲角度 α 与方向舵机控制信号 Δs_1 。以肘关节伸直时 y 轴方向为 $\alpha=0^\circ$,弯曲时 x 轴方向为 $\alpha=90^\circ$,对应机械臂坐标 x 轴 $\theta=0^\circ$ 到 y 轴 $\theta=90^\circ$ 。

对FBG₁进行预紧力测试,每增加0.1 N记录由0 N增加到1.5 N得到 λ_1 为1 549.637 976~1 551.275 914 nm,每增加0.1 N线性变化0.109 195 8 nm,符合线性关系。如图6所示,采用肘关节弯曲里侧放置FBG₁的检测方式,以保证关节运动的开合力与光栅中心波长呈线性关系。舵机控制信号为50 Hz,脉宽为1 111 μs 对应起始 0° ,1 758 μs 对应 90° 。

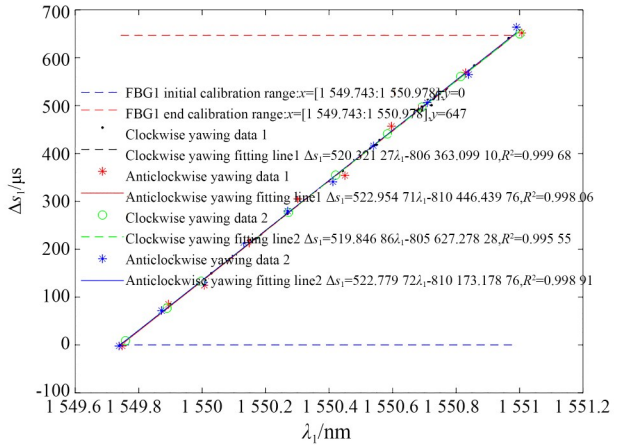
穿戴好设备进行系统初始化,得出方向控

制脉宽 S_1 的量程 $\Delta s_1=647\ \mu\text{s}$ 。然后进行方向控制标定,分别记录肘关节 x 轴方向和 y 轴方向的中心波长为初始值和终值。在线性范围内,得到方向FBG₁检测量程 $\Delta\lambda_1=1.235\ \text{nm}$,如图6(b)所示。由式(11)得出,肘关节方向控制波电转换关系为 $\Delta s_1=523.886\ 63(\lambda_1-\lambda_{1s})$ 。实验方向检测和控制量程在图6(b)中用FBG₁红色虚线和蓝色虚线标出(彩图见期刊电子版)。

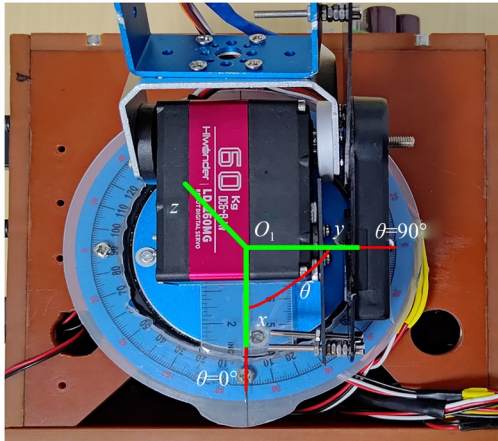
进行4次方向控制波电转换重复实验,分别记录肘关节由初始方向到终端方向的2次正行程和2次返回程弯曲运动,每弯曲 10° 肘关节记录当前中心波长 λ_1 与 Δs_1 脉宽输出值。最终,实验分别得到方向角转换系数 $k_{11}=520.321\ 27\ \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{12}=522.954\ 71\ \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{13}=519.846\ 86\ \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{14}=522.779\ 72\ \mu\text{s}/\text{nm}$ 。波电转换误差 e_{kij} (i 代



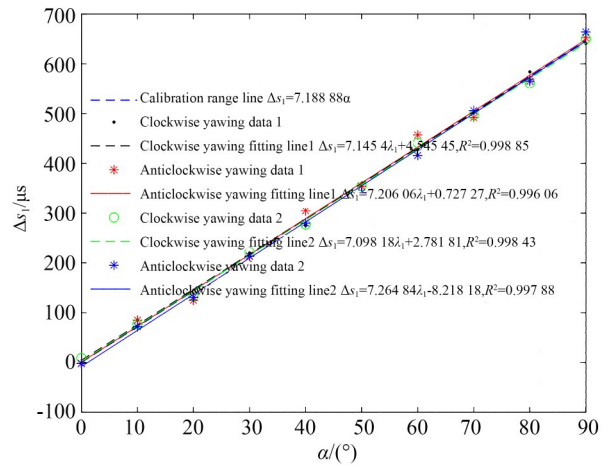
(a) 肘关节弯曲检测
(a) Elbow yawing detection



(b) FBG₁波电转换
(b) FBG₁ wavelength-electric conversion



(c) s₁方向控制
(c) s₁ direction control



(d) 方向控制输出
(d) Direction control output

图 6 方向控制实验结果

Fig. 6 Experiment results of direction control

表不同姿态角度控制, j 代表实验次数) 如下:
 $e_{k11} = 3.56536 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k12} = 0.93192 \mu\text{s}/\text{nm}$,
 $e_{k13} = 4.03977 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k14} = 1.10691 \mu\text{s}/\text{nm}$ 。

实验结果如图 6(b) 所示。由实验结果可知, 光纤光栅波电转换系统检测肘关节弯曲运动的线性度最小达到 99.55%。由误差累加分析可知, 在检测量程 $\Delta\lambda_1$ 内, 得到的波电转换系统偏差 ($e_{klj} \times \Delta\lambda_1$) 分别为 4.40321, 1.15092, 4.98911, 1.36703 μs ; 肘关节运动方向控制输出的波电转换累积误差 ($e_{klj} \times \Delta\lambda_1/\Delta s_1$) 分别为 0.68055%, 0.17788%, 0.77111%, 0.21128%。

方向跟随输出实验如图 6(d) 所示, 机械臂方

向运动可线性地跟随肘关节弯曲, 平均线性度达到 99.78%, 最大迟滞性误差为 4.64%。方向控制输出系数 c_1 与系统标定系数的对比误差分别为 $e_{c11} = 0.07434 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c12} = 0.01717 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c13} = 0.09070 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c14} = 0.07595 \mu\text{s}/(^{\circ})$, 累加输出最大误差 ($e_{clj} \times 90^{\circ}$) 分别是 6.69132, 1.54548, 8.16372, 6.83568 μs ; 误差 ($e_{clj} \times \frac{90^{\circ}}{\Delta s_1}$) 分别为 1.03420%, 0.23886%, 1.26178%, 1.05651%。由此可知, 控制输出量程为 90° 时, 最终输出的控制累计偏差 ($e_{clj} \times$

$\frac{90^\circ}{\Delta s_1} \times 90^\circ$)最大为 1.13560° 。

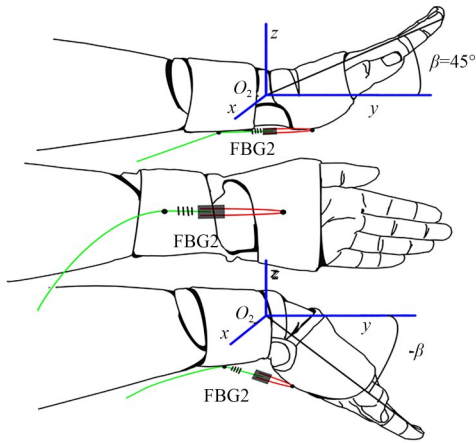
5.2 高度控制

如图 7(a)所示,实验采用 FBG₂ 检测腕关节俯仰角度进行机械臂高度控制。高度实验分别记录腕关节俯仰角度 β 与高度舵机控制信号 Δs_2 。以腕关节水平伸直为 0° ,量程为向下弯曲 -45° 到向上弯曲 45° 。当腕关节自然伸直时,高度舵机处于悬停状态为 45° ,腕关节向上抬起 45° 控制高度舵机运动到竖直状态实现举起,腕关节向下弯曲到 -45° ,舵机运动到水平状态实现放下。 s_4 控制平衡舵机与 s_2 号高度控制采用联动控制方式,如图 2 所示,两承梁臂之间的夹角互补。

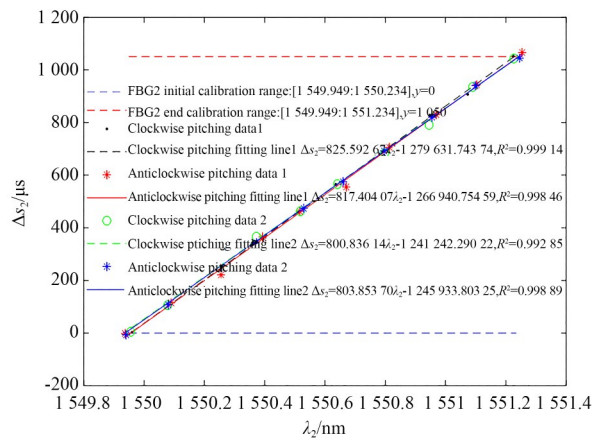
其中,平衡舵机 $S_4=(S_2-1140)$,以保证机械爪平衡。

对 FBG₂ 进行预紧力测试,当轴向应力从 0 N 增加到 1.5 N 时, λ_2 的线性变化范围为 1549.787455~1551.793413 nm。如图 7(a)所示,采用掌心方向放置 FBG₂ 的检测方式,当腕关节向上抬起拉高时,拉力环受力变大,机械臂举起以符合人体运动规律。舵机控制信号为 50 Hz,脉宽为 1450 μ s 对应起始 0° ,2500 μ s 对应 90° 。

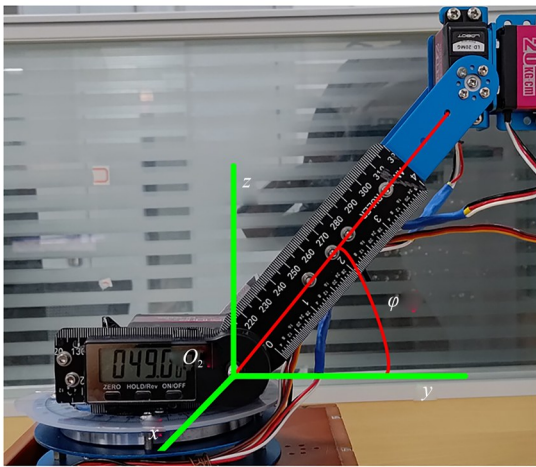
与方向控制实验同理,首先进行系统标定,初始化高度控制脉宽 S_2 量程 $\Delta s_2=1050 \mu$ s, 后进行腕关节 FBG₂ 的标定。分别记录腕关节运动 -45° 方向和 45° 方向的中心波长为初始值和终



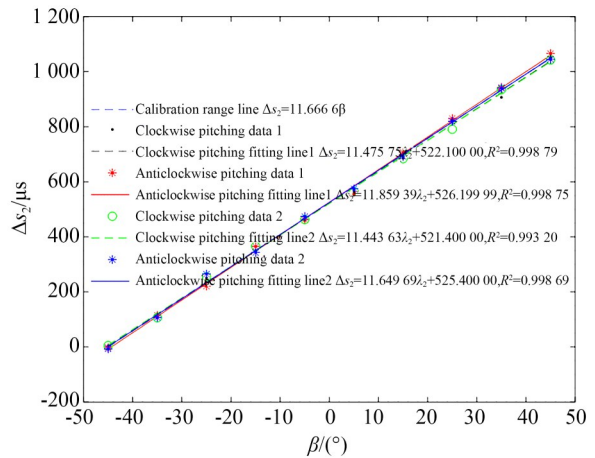
(a) 腕关节俯仰检测
(a) Wrist pitching detection



(b) FBG₂ 波电转换
(b) FBG₂ wavelength-electric conversion



(c) s_2 高度控制
(c) s_2 height control



(d) 高度控制输出
(d) Height control output

图 7 高度控制实验结果

Fig. 7 Height control experiment results

值。在线性范围内得到高度FBG₂的检测量程 $\Delta\lambda_2 = 1.285 \text{ nm}$,如图7(b)所示。由式(12)得出,腕关节高度控制波电转换关系为 $\Delta s_2 = 817.12062(\lambda_2 - \lambda_{2s})$ 。高度控制实验的检测量程和控制量程如图7(b)中FBG₂的红色虚线和蓝色虚线所示。

进行4次高度控制波电转化重复实验,在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 分别记录2次腕关节正行程和2次返行程运动,每弯曲 10° 记录当前中心波长 λ_2 与 Δs_2 脉宽输出值。最终得到高度波电转换系数 $k_{21} = 825.59267 \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{22} = 817.40407 \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{23} = 800.83614 \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{24} = 803.85370 \mu\text{s}/\text{nm}$ 。转换偏差分别为 $e_{k21} = 8.47205 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k22} = 0.28345 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k23} = 16.28448 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k24} = 13.26692 \mu\text{s}/\text{nm}$ 。实验结果如图7(b)所示。由实验结果可知,光纤光栅波电转换系统检测腕关节俯仰运动的线性度最小达到99.28%。由误差累加分析可知,在检测量程 $\Delta\lambda_2$ 内,得到的波电转换系统偏差分别为10.88658,0.36423,20.92555,17.04799 μs ;腕关节俯仰控制输出的波电转换累积误差为1.03681%,0.03468%,1.99291%,1.62361%。

高度跟随输出实验如图7(d)所示,机械臂高度运动可线性地跟随腕关节俯仰,平均线性度达到99.73%,最大迟滞性误差为2.86%。高度控制输出 c_2 与系统标定系数对比误差分别为 $e_{c21} = 0.19091 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c22} = 0.19272 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c23} = 0.22303 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c24} = 0.01697 \mu\text{s}/(^{\circ})$ 。累加输出最大偏差分别是17.18244,17.34516,20.07324,1.52784 μs ;误差分别为1.63642%,1.65192%,1.91173%,0.14550%。最终输出的控制累计误差最大为1.72056°。

5.3 开合控制

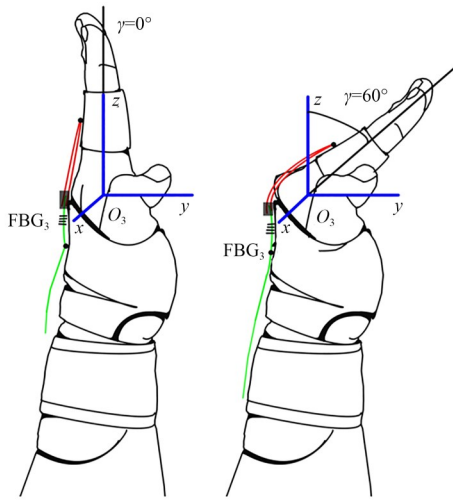
如图8(a)所示,实验采用FBG₃检测指关节开合角度进行机械爪开合控制。开合实验分别记录手指弯曲 γ 角度与机械爪开合角度 ψ 。为模仿人体运动,采用背面放置FBG₃的检测方式。手指自然舒展时对应机械爪的张开状态,手指向下弯曲时,受力变大对应手爪咬合力变大以此符合人体运动规律。

对FBG₃进行预紧力测试,当轴向应力从0 N

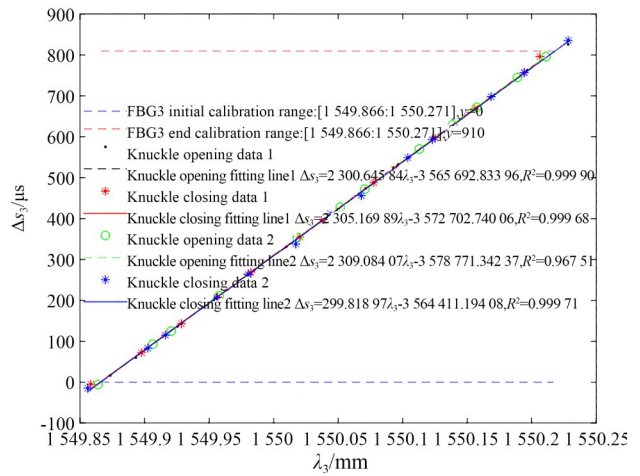
增加到1.5 N时, λ_3 的线性变化范围为1549.498987~1551.294310 nm。由于手爪两指的设计为主从动驱动设计,因此实验测量单边手爪开合角度,如图8(c)所示。手指自然弯曲,检测运动量程为 60° ,单边主驱控制为 60° 。舵机控制信号为50 Hz。脉宽为1200 μs 对应起始 0° ,2010 μs 对应 60° 。

进行系统初始化,机械爪开合控制脉宽 S_3 控制量程 $\Delta s_3 = 810 \mu\text{s}$ 。然后进行开合控制标定,分别记录指关节运动 0° 方向和 60° 方向的中心波长为初始值和终值,在线性范围内得到开合FBG₃的检测量程 $\Delta\lambda_3 = 0.351 \text{ nm}$,如图8(b)所示。由实验结果可知,光纤光栅波电转换系统检测指关节开合运动的线性度最小达到96.75%。由式(13)得出,指关节开合控制波电转换关系为 $\Delta s_3 = 2307.69230(\lambda_3 - \lambda_{3s})$ 。开合控制实验的检测量程和控制量程如图8(b)中FBG₃的红色虚线和蓝色虚线所示(彩图见期刊电子版)。进行4次开合控制波电转换重复实验,记录2次指关节由 0° 弯曲到 60° 正行程和2次返行程,每弯曲 5° 记录当前实时波长 λ_3 与脉宽输出值 Δs_3 。最终实验得到高度控制转换系数 $k_{31} = 2300.64584 \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{32} = 2305.16989 \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{33} = 2309.08407 \mu\text{s}/\text{nm}$, $k_{34} = 2299.81897 \mu\text{s}/\text{nm}$ 。转换偏差分别为 $e_{k31} = 7.04646 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k32} = 2.52241 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k33} = 1.39176 \mu\text{s}/\text{nm}$, $e_{k34} = 7.87333 \mu\text{s}/\text{nm}$ 。由误差累加分析可知,在检测量程 $\Delta\lambda_3$ 内,波电转换系统误差为2.47330,0.88536,0.48851,2.76353 μs ;指关节开合控制输出的波电转换累积误差分别为0.30534%,0.10930%,0.06031%,0.34117%。

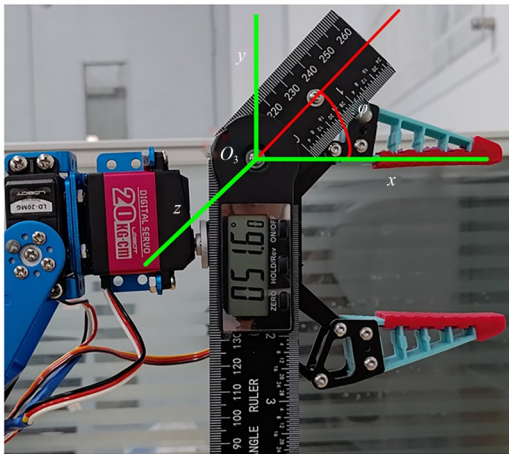
开合跟随输出实验如图8(d)所示,机械手爪开合运动可线性地跟随指关节开合运动,平均线性度达到98.94%,最大迟滞性误差为4.57%。开合角度输出 c_3 与系统标定系数的对比误差分别为 $e_{c31} = 0.20769 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c32} = 0.15495 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c33} = 0.02528 \mu\text{s}/(^{\circ})$, $e_{c34} = 0.41098 \mu\text{s}/(^{\circ})$;累加输出最大误差分别是12.46140,9.29700,1.51680,24.65880 μs ;误差分别为1.53844%,1.14777%,0.18725%,3.04429%。最终输出的控制累计偏差最大为1.82657°。



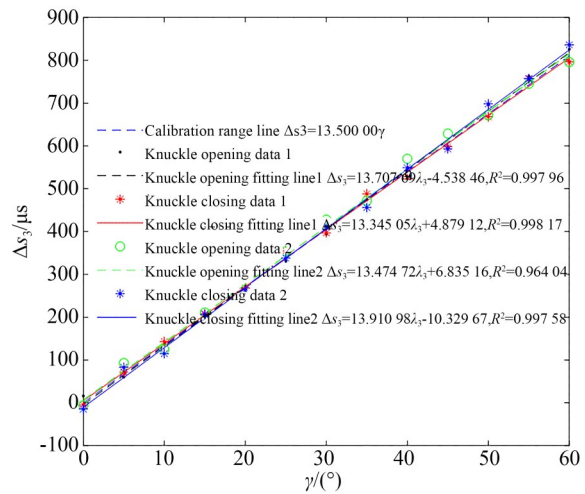
(a) 指关节开合检测
(a) Knuckle opening and closing detection



(b) FBG₃波电转换
(b) FBG₃ wavelength-electric conversion



(c) s_3 开合控制
(c) s_3 Opening and closing control



(d) 开合控制输出
(d) Opening and closing control output

图 8 机械爪开合控制实验结果

Fig. 8 Mechanical jaw opening and closing control experiment results

6 结 论

本文根据人体手臂运动规律,设计了光纤布拉格光栅感知护具,进行人体上肢运动姿态提取分析,采用弹性绳拉力环施加预紧力的方式有效解决了关节运动引起的轴向牵引力方向偏移的问题。结合人体手臂的不同关节部位运动特征,通过构建光中心波长与 PWM 电信号的转换关系,实现了机械臂仿生跟随的运动控制。通过初始化参数设置和动态校准模块来进行肘关节弯

曲、腕关节俯仰、指关节开合的标定和动作检测,实现了对于机械臂的方向、高度及机械爪开合的控制。重点分析了由于精度位数识别和波电信号转换过程中带来的波电转换系数 k_i 误差,并分析了最终控制输出系数 c_i 的误差,推导出光纤光栅中心波长信号与机械臂 PWM 控制信号的对应关系。最终结果显示,在人体手臂运动检测量程和机械臂控制输出量程内,波电转换的最大累积误差 e_{ki} 分别是 0.771 11%, 1.992 91%, 0.341 17%, 方向、高度、开合 3 个控制角度的最

大误差分别是 $1.135\ 60^\circ$, $1.720\ 56^\circ$, $1.826\ 57^\circ$ 。FBG 仿生控制实验在室温 $25\ ^\circ\text{C}$ 下进行,进一步

研究将采用多支 FBG 差动设计来实现温度变化情况下的波电转换。

参考文献:

- [1] PALEP J. Robotic assisted minimally invasive surgery [J]. *Journal of Minimal Access Surgery*, 2009, 5(1): 1.
- [2] 胡炼, 王志敏, 汪沛, 等. 基于激光感知的农业机器人定位系统[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(5):1-7.
HU L, WANG ZH M, WANG P, *et al.* Agricultural robot positioning system based on laser sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(5):1-7. (in Chinese)
- [3] 李振, 赵欢, 王辉, 等. 机器人磨抛加工接触稳态自适应力跟踪研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(9): 200-209.
LI ZH, ZHAO H, WANG H, *et al.* Research on contact steady-state adaptive force tracking of robot grinding and polishing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(9): 200-209. (in Chinese)
- [4] 王仕强, 于佩航, 喻建胜, 等. 放喷管线自动打磨爬行机器人设计与试验[J]. *机械设计与研究*, 2023, 39(1): 22-25, 30.
WANG SH Q, YU P H, YU J SH, *et al.* Design and test of automatic grinding crawling robot for relief pipeline [J]. *Machine Design & Research*, 2023, 39(1): 22-25, 30. (in Chinese)
- [5] 张凯, 张尚盈, 陈皓晖, 等. 水陆两栖仿生机器人水下步态生成研究[J/OL]. *机械科学与技术*, 2023: 1-6.
ZHANG K, ZHANG S Y, CHEN H H, *et al.* Research on underwater gait generation of the amphibious bionic robot [J/OL]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023: 1-6. (in Chinese)
- [6] 高勇, 陈伟海, 陆震, 等. 蟑螂机器人仿生机理及运动控制[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(13):91-99.
GAO Y, CHEN W H, LU ZH, *et al.* Bionic mechanism and locomotion control for a cockroach robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(13):91-99. (in Chinese)
- [7] 黄品高, 黄剑平, 黄博俊, 等. 实现下肢假肢智能仿生控制的神经功能重建及行走意图识别方法[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(S1):227-235.
HUANG P G, HUANG J P, HUANG B J, *et al.* The methods of neuromuscular function reinnervation and ambulation-intention recognition of lower-limb amputees to realize the intelligent and bionic control of powered prosthetic legs [J]. *Fundamental Research Science Foundation in China*, 2021, 35(S1):227-235. (in Chinese)
- [8] 晏益朋, 余城洋, 熊露婧, 等. 一种基于离散时域模型的单相 PWM 整流器控制参数多目标优化设计方法[J]. *电工技术学报*, 2023(38):1-12.
YAN Y P, YU CH Y, XIONG L J, *et al.* A multi-objective controller parameter design optimization method of single-phase PWM rectifier with discrete-time domain model [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023(38):1-12. (in Chinese)
- [9] 张洁, 何文涛, 冯华星. 基于直流无刷电机的 PWM 电路设计[J]. *微电子学与计算机*, 2021, 38(3): 84-88.
ZHANG J, HE W T, FENG H X. The design of PWM circuit based on DC brushless motor [J]. *Microelectronics & Computer*, 2021, 38(3): 84-88. (in Chinese)
- [10] 史晓娟, 姚兵, 王磊, 等. 基于 STM32 和 LabVIEW 的嵌入式可编程控制系统 [J]. *仪表技术与传感器*, 2023(4): 97-101.
SHI X J, YAO B, WANG L, *et al.* Embedded programmable control system based on STM32 and LabVIEW [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2023(4): 97-101. (in Chinese)
- [11] 吴凯, 周悦, 郭威, 等. 海岸带履带机器人控制系统的研究与设计 [J]. *制造业自动化*, 2022, 44(11):24-28.
WU K, ZHOU Y, GUO W, *et al.* Research and design of the control system of coastal track robot [J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(11): 24-28. (in Chinese)
- [12] ZHANG H, ZHANG D Z, WANG Z H, *et al.* Ultrastretchable, self-healing conductive hydrogel-based triboelectric nanogenerators for human-computer interaction [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(4): 5128-5138.
- [13] 卢思彤, 李柏晨, 阎吉雅, 等. 柔性仿生手指关节的触觉力/角度感知 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(4): 470-478.
LU S T, LI B CH, YAN J Y, *et al.* A tactile force/Angle perception method for flexible humanoid finger joints [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(4): 470-478. (in Chinese)

- [14] AI Q S, ZHAO M Y, CHEN K, *et al.* Flexible coding scheme for robotic arm control driven by motor imagery decoding[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2022, 19(5): 056008.
- [15] 赵雪. 基于手臂姿态和视觉的遥操作人机协作研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
ZHAO X. *Research on Human-Robot Collaboration of Teleoperation Based on Arm Posture and Vision* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [16] 刘正雄, 司继康, 陈刚, 等. 面向遥操作手眼协调的虚拟仿真交互控制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(5):1146-1151.
LIU Zh X, SI J K, CHEN G, *et al.* Interaction control method of virtual simulation for hand-eye coordination in teleoperation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(5):1146-1151. (in Chinese)
- [17] 葛俊彦, 史金龙, 周志强, 等. 基于三维检测网络的机器人抓取方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(8): 146-153.
GE J Y, SHI J L, ZHOU ZH Q, *et al.* A robotic grasping method based on three-dimensional detection network[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(8): 146-153. (in Chinese)
- [18] SANDRA D, JOÃO S, JAIME C. Optimized in-vehicle multi person human body pose detection [J]. *Procedia Computer Science*, 2022, 204: 479-487.
- [19] KHAN T. An intelligent baby monitor with automatic sleeping posture detection and notification [J]. *AI*, 2021, 2(2): 290-306.
- [20] 郭永兴, 张航, 熊丽, 等. 基于光纤布拉格光栅的扑翼机器人三维扑动变形测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(9): 1304-1313.
GUO Y X, ZHANG H, XIONG L, *et al.* Fiber Bragg grating based 3D flutter deformation measurement of flapping wing robot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1304-1313. (in Chinese)
- [21] FENG Y, LIU H, LIU P. Assessment for two-dimensional sliding based on cantilever beams with optical fiber Bragg gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 67: 102729.
- [22] GUO Y, ZHU J, XIONG L, *et al.* Finger motion detection based on optical fiber Bragg grating with polyimide substrate[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 338: 113482.
- [23] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- [24] LI L Q, HE R J, SOARES M S, *et al.* Embedded FBG-based sensor for joint movement monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(23): 26793-26798.
- [25] APIWATTANADEJ T, CHUN B J, LEE H, *et al.* Stability test of the silicon Fiber Bragg Grating embroidered on textile for joint angle measurement [C]. *Proc SPIE 10449, Fifth International Conference on Optical and Photonics Engineering*, 2017, 10449: 47-52.
- [26] SILVA A FDA, GONCALVES A F, MENDES P M, *et al.* FBG sensing glove for monitoring hand posture[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(10): 2442-2448.
- [27] ZALTIERI M, MASSARONI C, PRESTI DLO, *et al.* A wearable device based on a fiber Bragg grating sensor for low back movements monitoring[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(14): 3825.
- [28] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8):1442-1463.

作者简介:



王昊祥(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感。E-mail:1721363310@qq.com

通讯作者:



冯艳(1976—),女,博士,教授,主要研究方向为光纤光栅传感、智能机器人触觉感知等。E-mail: xmfy0833@sina.com