

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003250

# 一种可穿戴指间角度测量系统设计\*

吴常铖<sup>1,2</sup> 曹青青<sup>3</sup> 费飞<sup>1</sup> 杨德华<sup>1</sup> 许进<sup>1</sup> 宋爱国<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 自动化学院 南京 211106; 2. 东南大学 仪器科学与工程学院 南京 210096;  
3. 南京工业职业技术学院 航空工程学院 南京 210023)

**摘要:**针对人机交互的需求提出了一种可穿戴的指间角度测量系统。首先,基于弹簧片和应变片设计了可穿戴的指间角度传感器及其便携式测量电路,对指间角度的测量原理和传感器的测量电路进行了详细分析。其次,基于LabVIEW开发了测量系统的上位机软件,对指间角度传感器的数据进行滤波和角度解算,并采用图片分割旋转的方法实现了指间角度的可视化动态显示。最后,为验证系统的有效性进行了实验,结果表明,在0~30°测量范围内,设计的指间角度传感器的非线性误差为2.38%FS,迟滞误差为1.94%FS,重复性误差为5.29%FS,总精度为6.11%FS。

**关键词:**可穿戴;指间角度;应变片

**中图分类号:** TN709 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Design of a wearable measurement system for angle between fingers

Wu Changcheng<sup>1,2</sup> Cao Qingqing<sup>3</sup> Fei Fei<sup>1</sup> Yang Dehua<sup>1</sup> Xu Jin<sup>1</sup> Song Aiguo<sup>2</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
3. School of Aviation Engineering, Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** To meet the needs of human-computer interaction, a wearable measurement system for angle between fingers is proposed in this paper. Firstly, based on spring sheet and strain gauge, a wearable sensor for the measurement of angle between fingers and a portable measurement circuit are designed. The measurement principle of angle between fingers and measurement circuit of sensor are analyzed in detail. Secondly, computer software is developed in LabVIEW. Data captured by the developed sensor is filtered and then converted to angle information by the computer software. And the angle between fingers is synchronous dynamic displayed by means of image segmentation and rotation. Finally, experiments are carried out to verify the effectiveness of the system. The experimental results show that the designed angle sensor has a nonlinear error of 2.38%FS, a hysteresis error of 1.94%FS, a repeatability error of 5.29%FS and a total accuracy of 6.11%FS within the measurement range of 0 to 30°.

**Keywords:** wearable; angle between fingers; strain gauge

## 0 引言

人机交互技术是通过人机交互设备获取人体的动作信息/动作意图,并将其用于远程虚拟/实体运动控制的一种信息交互方式。随着人工智能、信息技术等的发展,人机交互技术已经在机器人遥操作、高危环境下灾害救

援、虚拟医疗手术、虚拟游戏等领域有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。人手是一种由众多骨骼和肌肉复合而成的器官,能够完成多种复杂的动作。如何准确获取手部的运动信息是当前人机交互领域的一个研究热点。

近年来,国内外学者采用数据手套、机器视觉、加速度传感器、肌电信号、外骨骼机构等在手部运动信息获取方面进行了大量的研究<sup>[5-11]</sup>。文献[12]设计了一种基于

收稿日期:2020-06-17 Received Date: 2020-06-17

\* 基金项目:国家自然科学基金(61803201,91648206)、江苏省自然科学基金(BK20170803)、中国博士后科学基金(2019M661686)资助项目

弯曲电阻片的数据手套,并针对使用者的手指长度和手势习惯存在个体差异的问题提出了一种基于手指弯曲信息自适应学习和神经网络的数字手势识别方法。文献[13]基于 5DT 数据手套采用径向基(RBF)神经网络实现 13 个手势的识别并将其用于机器人的实时操作。文献[14]提出了一种基于加速度、陀螺仪和地磁多传感信息融合的数据手套并在 Unity 3D 中构建了手部模型用于实时反应操作者手部的运动信息。文献[15]提出了一种基于光学线性编码器的数据手套设计方案,实现了手部 14 个关节弯曲角度的测量。文献[16]设计了基于弯曲电阻、加速度传感器和陀螺仪的数据手套,并将其用于手语识别来帮助手语使用者与非使用者进行交流。文献[17]基于数据手套和深度相机采用迭代拟合三角形网格模型实现了手部运动的实时测量。文献[18]采用光纤研制了一款可以检测手部 10 个关节运动的数据手套,并将其用于数字手势和简单语言手势的识别。除了数据手套外,文献[19]构建了基于深度学习和机器视觉实现人机交互系统,实现手部三种动作的识别,准确率达 98%。文献[20]采用四通道的表面肌电信号进行手指弯曲动作的识别。

除了关节的弯曲角度外,手指间的张开角度也是手指姿态的一类重要信息,它在手语认知、虚拟游戏等人机交互中有着重要的作用。受传感元件以及手套结构的限制,上述基于弯曲电阻、光纤等的数据手套大多只关注手指弯曲信息的获取,对指间张开角度的研究较少。基于加速度传感器的数据手套虽然能获取指间张开角度,但是由于惯性传感元件存在漂移和累积误差,需要用卡尔曼滤波等复杂算法对数据进行校正才能满足长期使用需求。采用机器视觉方法虽然能获取手指间的张开角度信息,但在便携方面受限。

本文针对人机交互中指间角度的测量需求以及采用惯性传感器、机器视觉测量指间角度时存在的上述问题,设计了一种可穿戴的指间张开角度测量系统。本文对指间角度传感器的检测原理、测量电路进行了详细分析,同时为实现指间角度的动态显示,在 LabVIEW 平台开发可视化上位机软件。最后本文对设计的传感器进行了标定实验和指间角度测量实验。与惯性传感器相比,采用本文设计的指间角度传感器进行手指张开角度测量能够有效抑制漂移对测量结果的影响。此外,本文设计的指间角度传感器还可以方便地与弯曲电阻片等传感器集成在一起实现手指的多维度运动信息检测。

## 1 可穿戴指间角度传感器设计

如图 1(a)所示,本文以弹簧片作为敏感体进行指间张开角度的测量。两弹簧片的一端分别与两个指套的侧

面相连,两弹簧片的另一端通过铆钉与压力轴承连接在一起,弹簧片的中部粘贴有应变片。指套佩戴在手指上,当两手指张开时,弹簧片将发生弯曲形变,通过应变片检测弹簧片末端的挠度即可求得指间的张开角度。弹簧片和应变片的参数分别如表 1、2 所示。图 1(b)所示为指间角度传感器的穿戴示意图。

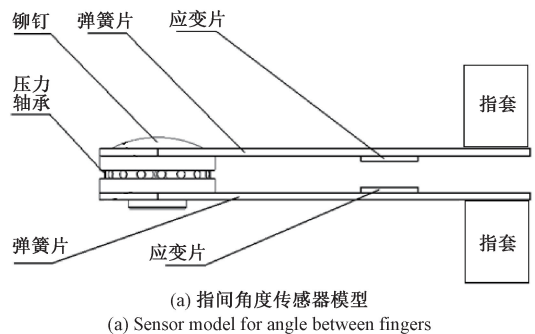


图 1 指间角度传感器模型及其穿戴示意图

Fig. 1 Sensor model for angle between fingers and its wearing-diagram

表 1 弹簧片参数

Table 1 Parameters of the spring sheet

参数	值
长	20 mm
宽	6 mm
厚	0.1 mm
弹性模量	210 GPa

表 2 BF350-3AA (11) 型应变片参数

Table 2 Parameters of the BF350-3AA (11) strain gauge

参数	值
阻值	$350 \pm 0.2 \Omega$
灵敏系数	$2.11\% \pm 1\%$
应变极限	20 000 $\mu\text{m}/\text{m}$
敏感栅尺寸	3.2 mm $\times$ 2.5 mm
基底尺寸	7 mm $\times$ 4 mm

由于大拇指的运动有掌骨的参与,导致大拇指的近节指骨与掌骨间关节的空间位置是可变的,因此本文设计的指间角度传感器不适用于大拇指与食指间角度的测量。

本文设计的指间角度传感器,其敏感元件以薄片的形式设置在两指间,不影响在手指背部设置弯曲电阻片等传感器来进行手指弯曲信息的测量。其中一种可行的方案是将本文设计的指间角度传感器嵌入普通的织物手套,并在手套的背面嵌入弯曲电阻片即可实现手指弯曲角度和指间展开角度的同步测量,该方案可应用于手语、虚拟游戏等人机交互场合。

如图 2 所示,当两根手指张开时,传感器的敏感体可以看作固定端连接在一起,自由端受力大小相等方向相反的两根悬臂梁。此时,悬臂梁自由端的挠度  $\omega_B$  与指间张开角度  $\theta$  的关系为:

$$\sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{\omega_B}{l} \quad (1)$$

式中: $l$  为悬臂梁的长度,即弹簧片的长度。

手指张开时,悬臂梁自由端的挠度为:

$$|\omega_B| = \frac{4Fl^3}{bh^3E} \quad (2)$$

式中: $E$  为弹簧片的杨氏模量; $F$  为作用在弹簧片末端上的力; $b$  和  $h$  分别为弹簧片的宽度和厚度。

距离固定端为  $l_1$  的弹簧片表面点  $p$  的轴向应变为:

$$\varepsilon_x = \frac{6F(l-l_1)}{Ebh^2} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得:

$$\varepsilon_x = \frac{3(l-l_1)h}{2l^2} \sin \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

即:

$$\theta = 2\arcsin \frac{2l^2\varepsilon_x}{3(l-l_1)h} \quad (5)$$

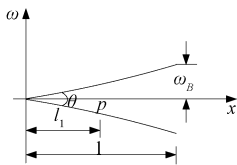


图 2 指间角度传感器测量原理

Fig. 2 Measurement schematic diagram of the angle sensor

通过测量弹簧片表面点  $p$  处的应变即可计算得到指间的张开角度。本文选用最大应变为  $20\ 000\ \mu\varepsilon$  的应变片并将其粘贴在弹簧片的中部进行指间角度的测量,弹簧片的长度和厚度分别为  $2\ \text{cm}$  和  $0.1\ \text{mm}$ ,则可测量指间角度为:

$$\theta = 2\arcsin \frac{4l\varepsilon_{\max}}{3h} \approx 38.94^\circ \quad (6)$$

由于应变片测量的是其栅长范围内感受应变量的平均值,在进行动态测量时,测量误差为:

$$\delta = 1 - \frac{\sin \frac{\pi l_0}{\lambda}}{\frac{\pi l_0}{\lambda}} \quad (7)$$

式中: $l_0$  为应变片敏感栅长度; $\lambda$  为应变波波长。

当  $l/\lambda \ll 1$  时,有:

$$\delta \approx -\frac{1}{6} \left( \frac{\pi l_0}{v} \right)^2 \quad (8)$$

式中: $f$  为应变波的频率, $v$  为应变波在弹簧片中的传播速度。取测量误差为  $1\%$  及应变波在弹簧片中的传播速度为  $5\ 100\ \text{m/s}$ ,则由式(8)可得,本文设计的指间角度传感器测量频率范围约为  $0 \sim 124\ \text{kHz}$ ,能够很好地满足正常人手部动作信息( $5\ \text{Hz}$ )的测量要求。

## 2 测量电路设计

本文设计的测量电路框图如图 3 所示。基于电桥的信号调理电路将应变片捕获的指间角度信息转换为电信号。选用自带 AD 转换器的 C8051F320 单片机作为控制器实时采集调理电路输出的信号并将其通过蓝牙模块发送给计算机。测量电路采用  $3.7\ \text{V}$  可充锂电池进行供电,同时设计了基于锂电池电压的低电报警电路。

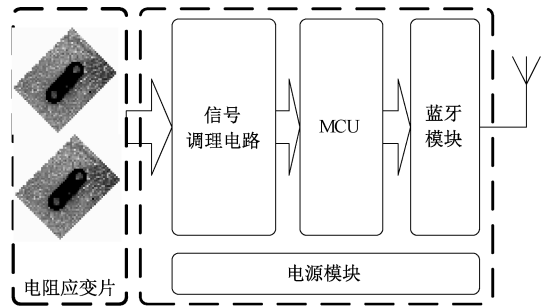


图 3 测量电路框图

Fig. 3 Block diagram of the measurement circuit

如图 4 所示,设计由电桥和仪用放大器 AD623 构成的应变片信号调理电路。调理电路的输出  $U_o$  及电桥的输出  $U_g$  为:

$$U_o = AU_g \quad (9)$$

$$U_g = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U$$

式中: $A$  为 AD623 的放大倍数, $U$  为电桥供电电压, $R_2$ 、 $R_3$  为粘贴在弹簧片上的电阻应变片,且有  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 。

当指间角度变化时,指套带动弹簧片运动引起弹簧片弯曲程度的变化从而导致应变片阻值的变化。假设两弹簧片的弯曲引起应变片阻值的变化量相同,记应变片

阻值的变化量为  $\Delta R$ , 则有:

$$U_g = \left( \frac{R_2 + \Delta R}{R_1 + R_2 + \Delta R} - \frac{R_4}{R_3 + \Delta R + R_4} \right) U = \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} U \quad (10)$$

由于应变片中存在:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (11)$$

式中:  $K$  为应变片的灵敏系数,  $\varepsilon$  为应变片受到的轴向应变。

由式(10)、(11)得:

$$\varepsilon \approx \frac{2U_g}{K} \quad (12)$$

由式(5)、(9)、(12)得:

$$\theta \approx 2\arcsin \frac{4l^2}{3(l-l_1)hAK} U_o \quad (13)$$

即信号调理电路的输出电压与指间张开角度成线性关系。

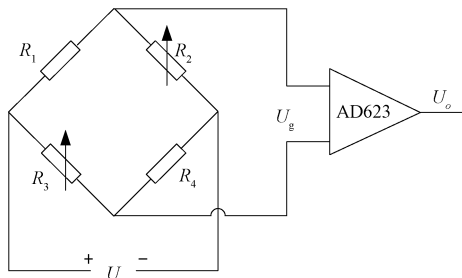


图 4 信号调理电路  
Fig. 4 Signal conditioning circuit

### 3 可视化软件设计

图 5 所示为本文在 LabVIEW 平台开发的指间角度可视化动态显示软件, 该软件主要包括通过“VISA”接口获取下位机测量得到的指间角度数据; 对下位机的测量数据进行均值滤波; 根据标定得到的系数计算指间角度; 指间角度的可视化显示。

以食指和中指间角度的动态显示为例, 本文通过在手部模型图片中选取中心点, 将食指、中指分别绕顺时针方向和逆时针方向旋转  $\theta/2$  的方式来实现指间角度的可视化动态显示。具体过程如下:

1) 如图 6 所示, 将手部图片转换为  $M \times N$  的像素矩阵并建立坐标系, 按像素位置将矩阵分割为食指部分、中指部分和手掌部分, 图中的任意一个像素点可表示为  $p(x, y)$ ,  $x$  和  $y$  分别为该像素点在矩阵中的纵横坐标。

2) 选择食指、中指与手掌的交汇点作为旋转中心(记为点  $Q$ ), 计算食指中任意一点和旋转中心点连线与

$y$  轴的夹角  $\theta_h$  以及两点间的距离  $L_{hQ}$ 。

$$\theta_h = \arctan \left( \frac{x_h - x_Q}{y_h - y_Q} \right) \quad (14)$$

$$L_{hQ} = \sqrt{(x_h - x_Q)^2 + (y_h - y_Q)^2} \quad (15)$$

式中:  $(x_h, y_h)$ 、 $(x_Q, y_Q)$  分别为  $h$  点和  $Q$  点的像素坐标。

3) 计算点  $h$  绕  $Q$  点旋转  $\alpha$  后的像素坐标(顺时针旋转时  $\alpha$  取负值, 逆时针旋转时  $\alpha$  取正值), 记旋转后的点为  $h'(x'_h, y'_h)$ , 则有:

$$\begin{cases} x'_h = x_Q + L_{hQ} \sin(\theta_h + \alpha) \\ y'_h = y_Q + L_{hQ} \cos(\theta_h + \alpha) \end{cases} \quad (16)$$

将原图中  $h$  像素点的像素值赋给新图中的  $h'$  像素点, 即可实现图片的旋转。食指部分的处理同上。

上述基于 LabVIEW 的指间角度动态显示方法中只需将图片的分割及旋转中心点稍作修改即可用于中指和无名指指间角度、无名指和小拇指指间角度的动态显示。



图 5 指间角度测量系统上位机软件  
Fig. 5 Software of the angle measurement system

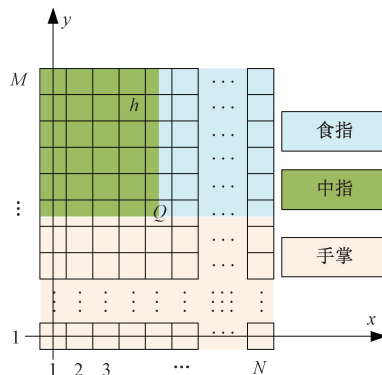


图 6  $M \times N$  矩形像素区域矩阵图  
Fig. 6  $M \times N$  pixel area matrix



## 4 实验

为验证指间角度测量系统的有效性,进行了实验研究。

### 4.1 标定实验

由于传感器在加工、装配过程中存在不可避免的偏差,导致采用式(13)得到的指间角度与真实值之间存在偏差,为了进一步提高测量的准确性,进行了标定实验。如图 7 所示,在白纸上刻画 7 条角度确定的直线,标定时受试者佩戴本文设计指间角度传感器,将手掌压在纸上并使食指与 0° 刻线对齐,分别控制中指与 5°、10°、15°、20°、25° 和 30° 刻线对齐,在此过程记录测量电路的输出值(表 3)。采用最小二乘法对表 3 中 3 组正、反行程的数据进行拟合,得到指间角度与传感器测量电路输出间的关系为:

$$y = 0.016 2x + 0.513 7 \quad (17)$$

式中: $x$  为测量电路的输出电压; $y$  为指间角度。

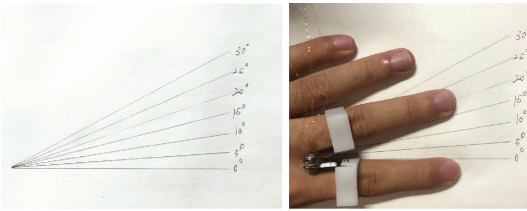


图 7 指间角度传感器标定实验场景

Fig. 7 Calibration experiment scene of the angle sensor

根据最小二乘法得到的传感器静态特性方程,得到表 3 测量数据对应的传感器理论输出值并求解静态特性指标。

表 3 传感器标定实验数据

Table 3 Experimental data of the sensor calibration

次数	不同角度下测量值/mV						
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	
1	正行程	225.8	587.1	812.9	1 245.2	1 483.9	1 790.3
	反行程	238.7	600.0	845.2	1 251.6	1 496.8	1 790.3
2	正行程	254.8	635.5	912.9	1 187.1	1 471.0	1 822.6
	反行程	280.6	651.6	941.9	1 216.1	1 500.0	1 822.6
3	正行程	251.6	622.6	848.4	1 229.0	1 490.3	1 816.1
	反行程	274.2	638.7	877.4	1 238.7	1 496.8	1 816.1

#### 1) 非线性误差

如式(18)所示,得到传感器的非线性误差  $\xi_L$  为 2.38%。

$$\xi_L = \frac{|\Delta Y_{L,\max}|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (18)$$

式中: $Y_{FS}$  为按拟合方程计算的传感器满量程输出; $\Delta Y_{L,\max}$  各个校准点上的实际平均输出与拟合方程理论输

出的最大差值。

#### 2) 迟滞误差

如式(19)所示,得到传感器的迟滞误差  $\xi_H$  为 1.94%。

$$\xi_H = \frac{|\Delta Y_{H,\max}|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (19)$$

式中: $\Delta Y_{H,\max}$  为正行程和反行程平均校准特性之间的最大差值。

#### 3) 重复性误差

如式(20)所示,取置信概率系数为 3,得到传感器的重复性误差  $\xi_R$  为 5.29%。

$$\xi_R = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m S_{L,i}^2 + \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m S_{D,i}^2 \right)}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (20)$$

式中: $m$  为校准点个数; $S_{L,i}$  和  $S_{D,i}$  分别第  $i$  个校准点上正行程和反行程校准数据的标准偏差。

#### 4) 总精度

由式(21)得到传感器的总精度  $A$  为 6.11%。

$$A = \sqrt{\xi_L^2 + \xi_H^2 + \xi_R^2} = 6.11\% \quad (21)$$

### 4.2 指间角度测量实验

如图 8 所示,将设计的指间角度传感器穿戴在受试者的食指和中指上,测试时受试者手掌向下平放在桌面上,手掌上方的相机正对着受试者的手部,用于拍摄受试者手指张开至不同角度时的照片。采用 Image J 对拍摄的照片进行处理即可得到实际的指间角度。受试者控制手指随机张开几个不同角度,每个角度位置记录 10 组数据,得到平均实验结果如表 4 所示。



图 8 指间角度测量实验场景

Fig. 8 Experimental scene of angle measurement

表 4 指间角度测量结果

Table 4 Experimental results of the angle measurement

	4.2	8.6	12.8	23.1	28.4
传感器测量结果	4.2	8.6	12.8	23.1	28.4
Image J 测量结果	5.8	6.9	11.9	24.4	29.9
误差	-1.6	1.7	-0.9	-1.3	-1.5

图 9 所示为受试者手指做“并拢-张开-并拢”动作过程中传感器测量得到的指间角度变化曲线。

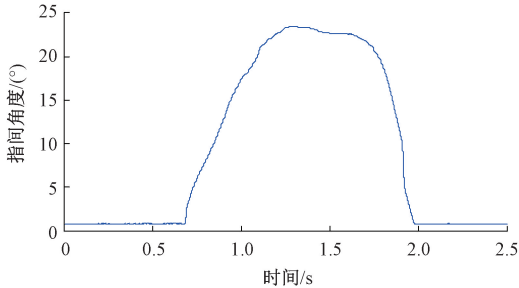


图 9 指间角度测量结果曲线

Fig. 9 Curve of the angle measurement results

## 5 结 论

本文针对人机交互中测量指间角度的需要设计了一种可穿戴的指间张开角度测量系统。采用弹簧片和应变片作为敏感体构建了可穿戴指间角度传感器并设计了便携式测量电路,详细分析了传感器的测量原理和测量电路;在 LabVIEW 平台上开发了可视化指间角度测量软件;采用最小二乘法对设计的指间角度传感器进行标定,实验结果表明本文设计的指间角度测量系统总精度为 6.11%FS。本文设计的指间角度测量系统实现指间角度的动态显示,可方便地与基于弯曲电阻片的数据手套配合并在手势识别等人机交互领域发挥作用。

## 参考文献

- [1] LI I, LIU Y, ZANG X. Human-machine interaction control system of a remote maintenance manipulator for tokamak [C]. 2018 Chinese Automation Congress, 2018: 336-340
- [2] SONG A C, WU C C, NI D J, et al. One-therapist to three-patient telerehabilitation robot system for the upper limb after stroke [J]. International Journal of Social Robotics, 2016, 8(2): 319-329.
- [3] SHIN A, OH J, LEE J. Apprentice of Oz: Human in the loop system for conversational robot wizard of Oz [C]. 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, 2019: 516-517.
- [4] 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.
- [5] LIU X D, HOU H X, YANG Y Q, et al. Design of an interactive system based on data glove [J]. Telecom World, 2019, 26(4): 313-314.
- [6] BARIBINA N, OKS A, BALTINA I, et al. Development of pressure sensitive glove prototype [J]. Key Engineering Materials, 2019, 800: 326-330.
- [7] 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]. IEEE Sensors, 2018: 1-4.
- [8] FANG B, SUN F, LIU H, GUO D. A novel data glove for fingers motion capture using inertial and magnetic measurement units [C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2016: 2099-2104.
- [9] 任如彬,朱利丰,刘佳,等.基于 LeapMotion 的个体化手部建模与实时交互 [J]. 测控技术, 2020, 39(2): 74-79.
- [10] REN R B, ZHU L F, LIU J, et al. Individualized hand modeling and real-time interaction based on leapmotion [J]. Measurement and Control Technology, 2020, 39(2): 74-79.
- [11] 徐云,王福能.采用 sEMG 的手势识别用 APSO/CS-SVM 方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 1-7.
- [12] XU Y, WANG F N. Gesture recognition method based on sEMG by APSO/CS-SVM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 1-7.
- [13] 李秀艳,刘宗毓,王琦,等.基于电学测量的智能手势识别方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 192-199.
- [14] LI X Y, LIU Z Y, WANG Q, et al. Research on the intelligent gesture recognition method based on electrical measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 192-199.
- [15] 邹俞,晁建刚,林万洪.遥操作视觉手势交互映射方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(20): 263-270.
- [16] ZOU Y, CHAO J G, LIN W H. Research on mapping method of visual gesture operation in teleportation [J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(20): 263-270.
- [17] 吴常铖,曹青青,费飞,等.基于数据手套和神经网络的数字手势识别方法 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(03): 563-569.
- [18] WU CH CH, CAO Q Q, FEI F, et al. Digital gesture recognition method based on data glove and neural networks [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 563-569.
- [19] 李东洁,李洋洋,杨柳. GL-RBF 优化的数据手套手势

- 识别算法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(4): 7-12.
- LI D J, LI Y Y, YANG L. Data glove gesture recognition algorithm based on GL-RBF neural network optimization [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(4): 7-12.
- [14] 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.
- ZHAO Y P, FEI F, YANG D H, et al. Research on data glove for hand rehabilitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2415-2421.
- [15] LI K, CHEN I M, YEO S H, et al. Development of finger-motion capturing device based on optical linear encoder [J]. The Journal of Rehabilitation Research and Development, 2011, 48(1): 69-82.
- [16] NEOH D, SAHARI K S, IBRAHIM W Z, et al. A dataglove hardware design and real-time sign gesture interpretation [C]. Soft Computing, 2018: 946-949.
- [17] JIANG L, XIA H, GUO C. A model-based system for real-time articulated hand tracking using a simple data glove and a depth camera [J]. Sensors, 2019, 19(4680): 1-29.
- [18] HUANG X, WANG Q, ZANG S, et al. Tracing the motion of finger joints for gesture recognition via sewing RGO-coated fibers onto a textile glove [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(20): 9504-9511.
- [19] 宋一凡, 张鹏, 刘立波. 基于视觉手势识别的人机交互系统 [J]. 计算机科学, 2019, 46(z2): 570-574.
- SONG Y F, ZHANG P, LIU L B. Human-machine interaction system with vision-based gesture recognition [J]. Computer Science, 2019, 46(z2): 570-574.
- [20] YOU K, RHEE K, SHIN H. Finger motion decoding using EMG signals corresponding various arm postures [J]. Experimental Neurobiology, 2010(19): 54-61.

### 作者简介



吴常铖(通信作者), 2010 年于吉林大学获得学士学位, 2016 年于东南大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学讲师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术、多模态人机交互技术。

E-mail: changchengwu@nuaa.edu.cn

**Wu Changcheng** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University in 2010 and Ph. D. degree from Southeast University in 2016. Now he is a lecturer at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include robotic sensor and control, multimodal human-machine interaction.