

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.010

# 基于 Google Glass 的远程解放双手式机器人控制系统\*

闻 玺<sup>1</sup> 宋 玉<sup>1</sup> 张 进<sup>2</sup> 李 伟<sup>1,2,3</sup> 孙富春<sup>4</sup> 李洪波<sup>4</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院 天津 300072; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016;  
3. 加州立大学贝克斯菲尔德分校 加利福尼亚 CA93311; 4. 清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘 要:**随着人机交互技术的发展,解放双手的技术也日益繁荣。在面对复杂任务时,解放双手的技术提供了新的交互渠道,丰富了交互信号的来源。利用 Google Glass 穿戴式的特点,搭建了一个解放双手的移动端机器人远程控制系统。该系统运用互补滤波器融合加速度传感器、陀螺仪以及地磁传感器的测量数据检测操作者的头部运动,并根据设计的控制器解析操作者的控制意图,然后经 WiFi 传送给被控机器人。同时,运用互补滤波器的高通滤波器成分成功地抑制了头部参考位置的漂移。为了验证系统的灵活性和可靠性,对其进行避障实验测试。实验结果表明,操作者能够流畅地控制机器人完成任务,成功地从任务中解放出双手,为遥控移动机器人提供了新的方式。此外,这一解放双手的系统对双手残疾者也大有益处。

**关键词:** 人机交互;解放双手;Google Glass;机器人;WiFi

**中图分类号:** TP242.6;TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Hands-free remote control system for robot based on Google Glass

Wen Xi<sup>1</sup> Song Yu<sup>1</sup> Zhang Jin<sup>2</sup> Li Wei<sup>1,2,3</sup> Sun Fuchun<sup>4</sup> Li Hongbo<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072 China;  
2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Shenyang 110016 China;  
3. Department of Computer & Electrical Engineering and Science, California State University, Bakersfield CA 93311 USA;  
4. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China.)

**Abstract:** With the development of human machine interaction (HMI) technology, the hands-free technology becomes more and more prosperous. When confronting a complex control task, it provides a new interactive channel, and enriches the source of interactive signal. In this paper, using the wearable characteristic of Google Glass, a hands-free remote control system for mobile robot is built. This system detects the operator's head gesture by processing data from accelerometers, geomagnetic sensors and gyroscopes through a complementary filter, designs a controller to parse the operator's control intention, and sends the intention to the robot through WiFi. Meanwhile, the drift of head gesture reference is eliminated by the high pass filter component of the complementary filter. In order to validate the effectiveness and the reliability of this system, a series of obstacle avoidance experiments are arranged. The experimental results show that the operator can smoothly navigate the robot to complete experimental tasks, successfully frees hand from tasks, and provides a new way of remotely controlling mobile robot. In addition, this hands free control system can benefit those with paralyzed limbs.

**Keywords:** HMI; hands-free; Google Glass; robot; WiFi

## 1 引 言

人机交互技术的生命力在于通过现代的人机互动设

备将人的意图直接转换成控制指令而完成对被控对象的控制。与传统的基于模型的控制方案相比,人机交互技术直接融合了人的智能,避免了繁琐而复杂的数学公式,从而被广泛应用。例如,对具备环境感知、动态决策与规

划以及行为控制与执行能力的智能机器人的交互控制<sup>[1]</sup>。然而,随着科技的发展,控制任务也变得越来越复杂。如多机器人系统执行任务时,操作者需要同时控制多个机器人进行作业,使得双手任务繁重<sup>[2-4]</sup>;由于内部舱体空间有限,“蛟龙号”在作业时,每个操作者都负责多项任务,且有时需要相互协作才能完成任务<sup>[5-6]</sup>;空间机器人在进行目标捕获时,需要同时控制钳子、太空缆索以及空间平台<sup>[7-9]</sup>。在面对这些操作难度大的任务时,仅仅依靠双手操作会给操作人员带来了极大的压力,因此加入可以解放双手的人机交互方式就显得尤为重要。

目前,解放双手的技术主要有语音识别技术<sup>[10-12]</sup>、体感技术<sup>[13-15]</sup>、脑电技术<sup>[16-21]</sup>、眼电技术<sup>[22-26]</sup>、肌电技术<sup>[27-29]</sup>等。近年来,穿戴式技术的兴起为解放双手的交互方式提供了新的技术支持。如智能头戴鼠标——SmartNav 为双手残疾者提供了一种新的计算机输入方式,是解放双手控制的一个成功应用<sup>[30]</sup>(<http://www.boundlessat.com/SmartNav-4>)。而 Google 公司发布的“拓展现实”眼镜——Google Glass,拥有更强大的数据处理能力,更能增强用户体验,使得 Google Glass 成为了穿戴式设备的代表产品。同时,它的诞生为基于穿戴式技术的解放双手交互提供了强有力的支持。目前,Google Glass 已经被应用于诸多领域,且均取得良好效果。例如,Jeroudi 等人<sup>[30]</sup>使用 Google Glass 的棱镜显示屏显示心电图,并且进行心电图解释,取得了一定的成果;

Rahimy 等人<sup>[31]</sup>使用 Google Glass 完整地记录了巩膜外手术的过程,为日后回放审查提供方便;Wille 等人<sup>[32]</sup>使用 Google Glass 显示玩具装配教程,促进了玩具装配工作的发展;Weppner 等人<sup>[33]</sup>利用 Google Glass 平台设计了一款声学相关部分物理实验的应用程序,帮助学生更好地理解水杯敲击声与杯中水的容量的关系,提高了教学效率。在机器人控制领域,Kapellmann-Zafra 等人<sup>[34]</sup>实现了一个存在障碍物的环境中使用 Google Glass 驾驶一群机器人搬运笨重物体;本研究组<sup>[35-38]</sup>在 Google Glass 远程控制机器人领域也进行了初步的探索,并取得了一些成果。

本文利用 Google Glass 可穿戴的特点,运用多传感器融合技术实现了操作者头部运动的检测,解析头部运动中的控制意图,并转换成控制指令发送给机器人,完成了对机器人的远程解放双手控制,为双手残疾者或双手被占用者提供了新的人机交互渠道。同时,运用互补滤波器中的高通滤波器成分解决了文献[35-36]中所提策略中存在的操作者头部参考位置漂移的问题。最后设计了避障实验对本系统的性能进行了测试。

## 2 系统平台

本文搭建的系统工作在 Google Glass 和 SRV-1 机器人平台上。整个系统由两部分组成,分别为:Google Glass 部分和机器人部分,如图 1 所示。

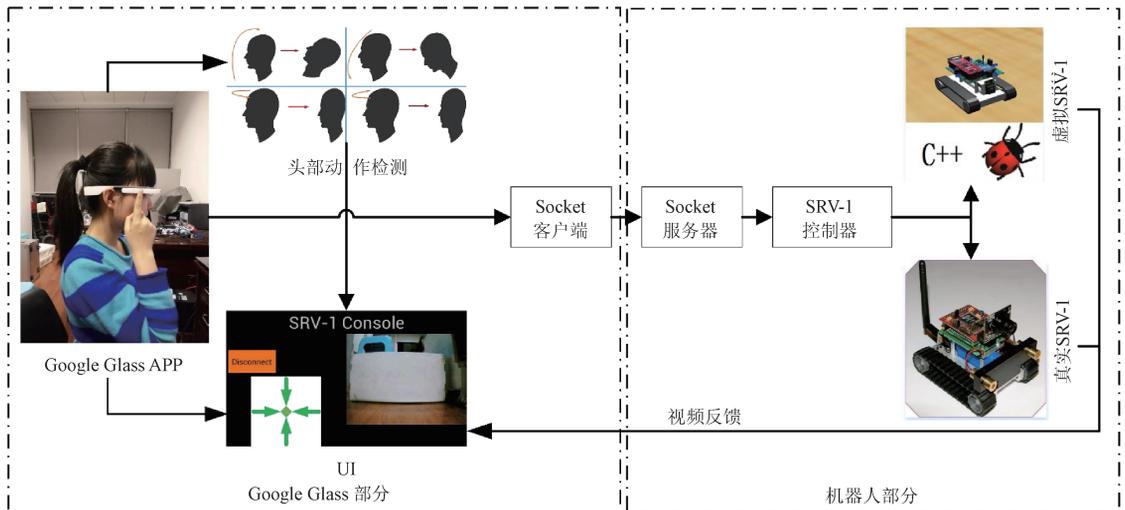


图 1 系统框图

Fig. 1 Block chart of system

### 2.1 Google Glass 简介

Google Glass 是一款配有光学头戴显示器的可穿戴式电脑,主要由 GPS、摄像头、棱镜显示屏、扬声器、麦克风以及电池 6 部分组成,如图 2 所示,搭载特殊定制的 Android 4.4.2 (KitKat) 操作系统,支持 WiFi 802.11 b/g

无线网络、蓝牙等。它保留了普通 Android 系统所支持的一部分传感器,这些传感器依据是否存在物理部件可分为两类:基于硬件的传感器和基于软件的传感器。基于硬件的传感器有加速度计、陀螺仪、地磁传感器等,基于软件的传感器有方向传感器和旋转矢量传感器(RVS)

等。开发者可以通过 3 种开发方式进行应用程序开发, 分别是 Mirror API Glassware、GDK Glassware 和 Hybrid Glassware (<https://developers.google.com/glass/design/>; [http://wear.techbrood.com/guide/topics/sensors/sensors\\_motion.html](http://wear.techbrood.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html))。

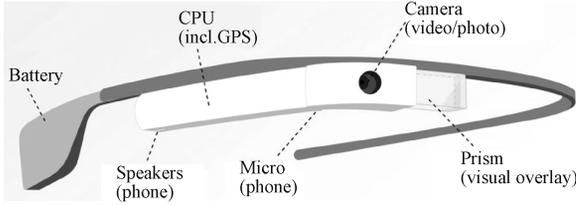


图 2 Google Glass 结构

Fig. 2 Google Glass structure

### 2.2 SRV-1 机器人

SRV-1 机器人是一款开源可无线控制的双履带移动机器人, 全称为 Surveyor SRV-1 Blackfin Robot, 由 SRV1 Blackfin 摄像头主板 (使用 Analog Devices 公司的 500 MHz Blackfin BF537 处理器), CMOS 摄像头 (分辨率由  $160 \times 280 \sim 1\,280 \times 1\,024$  像素), 激光照射点和 WLAN 802.11 b/g 无线通讯模块组成, 能够传送现场视频, 支持自主运行和集群模式, 被广泛地应用于研究、教育和勘探等领域。它还可以在 Blackfin 主板的固件之中运行 C 语言解释器, 解释执行 C 程序, 或者在 Windows、MacOS/X 和 Linux 等系统上运行 Python 或 Java 语言编写的控制台软件, 进行远程管理, 其内置的固件可以支持大量的第三方软件如 RoboRealm、微软的 Robotics Studio 和 Cyberbotic 的 Webots 等<sup>[38]</sup> (<http://www.robotreviews.com/reviews/surveyor-srv-1-blackfin-robot-review>)。

SRV-1 的结构模型如图 3 所示, 运动学模型如式(1) ~ (3)所示。

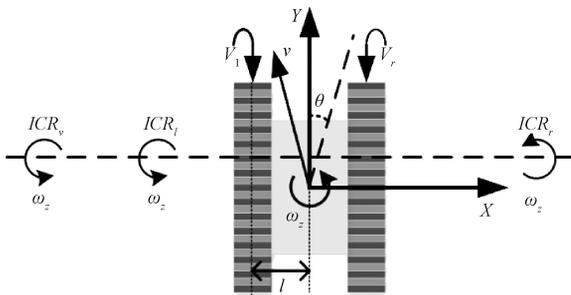


图 3 SRV-1 结构

Fig. 3 SRV-1 structure

$$\omega_z = \frac{V_r - V_l}{x_{ICR_r} - x_{ICR_l}}, \quad (3)$$

式中:  $v_x$  和  $v_y$  分别为机器人沿 X 轴和 Y 轴的线速度,  $\omega_z$  为轮的角速度,  $V_l$  和  $V_r$  分别是左右两边履带的线速度,  $x_{ICR_l}$  和  $x_{ICR_r}$  分别是左右履带在 X 轴方向的即时旋转中心,  $y_{ICR_r}$  是机器人在 Y 轴方向的即时旋转中心, 如图 3 所示。其逆向动力学关系如下:

$$V_l = v_y + x_{ICR_l} \omega_z \quad (4)$$

$$V_r = v_y + x_{ICR_r} \omega_z \quad (5)$$

式中:  $V_l$  和  $V_r$  的值依赖于  $v_y$ 、 $\omega_z$ 、 $x_{ICR_l}$  以及  $x_{ICR_r}$ , 不受  $v_x$  和  $y_{ICR_r}$  的影响<sup>[39-40]</sup>。机器人的运动速度  $v$  和曲率半径  $r$  为:

$$v = \frac{v_x + v_y}{2} \quad (6)$$

$$r = \left| \frac{ds}{d\theta} \right| = \left| \frac{ds/dt}{d\theta/dt} \right| = \left| \frac{v}{\omega_z} \right| = \left| \frac{v_r + v_l}{v_r - v_l} \right| \times l \quad (7)$$

### 3 头部运动检测

操作者头部运动的检测是实现本机器人控制系统的关键。头部运动的检测分为 3 步: 1) 传感器数据的获取; 2) 传感器数据的融合; 3) 头部运动识别规则的定义。

#### 3.1 传感器数据的获取

本文通过头部姿态角刻画头部运动, 为此引入三维空间坐标系描述头部姿态。在 Google Glass 上, 定义设备坐标系 X-Y-Z, 不同于普通的 Android 设备, 它是基于 Google Glass 显示屏定义的; 同时, 定义全局坐标系 x-y-z, 它们之间的关系如图 4 (a) 所示。头部姿态角则通过欧拉角 (Pitch、Yaw、Roll) 表示, 如图 4 (b) 所示。

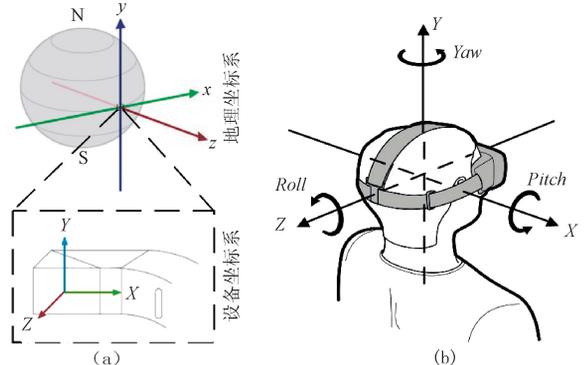


图 4 (a) 传感器坐标系; (b) 头部姿态角的定义

Fig. 4 (a) Sensor coordinate system;

(b) Head gesture angle definition

$$v_x = \frac{V_r - V_l}{x_{ICR_r} - x_{ICR_l}} y_{ICR_r} \quad (1)$$

$$v_y = \frac{V_r + V_l}{2} - \frac{V_r - V_l}{x_{ICR_r} - x_{ICR_l}} \left( \frac{x_{ICR_l} + x_{ICR_r}}{2} \right) \quad (2)$$

在 Android 操作系统的 API (application program interface) 中, 定义了一个 Sensor Manager 类和一个 Sensor Event Listener 接口帮助开发者操作传感器。这里有两种

获取头部姿态角的途径:1) 基于加速度传感器和地磁传感器的途径;2) 基于陀螺仪的途径。以途径 1) 为例,加速度传感器可以得到重力矢量数据(这个矢量是指向地心的方向),同时地磁传感器作为指南针来做辅助工作,通过读取二者的数据构造旋转矩阵  $R$  :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

使用函数 `Sensor Manager. get Rotation Matrix (accmagMatrix, null, accValues, magValues)` 计算旋转矩阵  $R$  的值,储在 `accmagMatrix` 变量中。然后通过函数 `Sensor Manager. get Orientation (accmagMatrix, accmagOrientation)` 获得欧拉角,公式如下<sup>[41]</sup> ([http://wear.techbrood.com/guide/topics/sensors/sensors\\_motion.html](http://wear.techbrood.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html)) :

$$\begin{cases} Yaw = \arctan(r_{12}/r_{22}) \\ Pitch = \arcsin(-r_{32}) \\ Roll = \arctan(-r_{31}/r_{33}) \end{cases} \quad (9)$$

以途径 2) 获取头部姿态角的方法与途径 1) 类似。到此完成了传感器数据的获取。

### 3.2 传感器数据的融合

运用上述两种途径,可以得到两种头部姿态角的测量结果。然而,同普通的 Android 设备一样,Google Glass 上的加速度传感器和地磁传感器会受到高频噪声的干扰;而陀螺仪是通过角速度乘以设备从开始移动到某一相对状态的时间间隔来计算旋转角度,这是一个循环往复的过程,在每一次的循环过程中都会产生细微的数据偏差,虽然这些偏差很细微,但是当它们积累以后的结果,往往会导致陀螺仪的数据计算出错,这就是积分漂移,在频域上表现为低频。记录操作者在做左转头这一动作时途径 1) 和 2) 的测量数据,数据量为  $N$ ,如图 5 (a) 和 (b) 所示,可以发现两种途径均受到干扰。倘若不加处理,头部姿态的测量结果将很难准确刻画头部运动。文献[35-36]中提出的基于旋转矢量传感器的策略,在控制过程中操作者头部的参考位置会发生漂移,导致机器人控制指令解析错误,控制失效,为此操作者不得不调整坐姿以克服参考位置漂移带来的问题。为了解决上述问题,本文引入以互补滤波器为核心的多传感器融合(MSF)算法来消除噪声干扰,解决操作者头部参考位置漂移问题。

互补滤波器是一种简单的传感器融合算法,它包含低通滤波器和高通滤波器两种成分,可以同时消除高频噪声和低频漂移,如图 6 所示。假设被测信号的真实值为  $C(s)$ ,通过两种不同途径测得的结果分别为  $C_1(s) = C(s) + \mu_H(s)$  和  $C_2(s) = C(s) + \mu_L(s)$ ,其中  $\mu_H(s)$  和  $\mu_L(s)$  分别为高频噪声和低频漂移。低通滤波器和高通滤波器的传递函数分别为  $G_L(s)$  和  $G_H(s)$ ,它们满足如

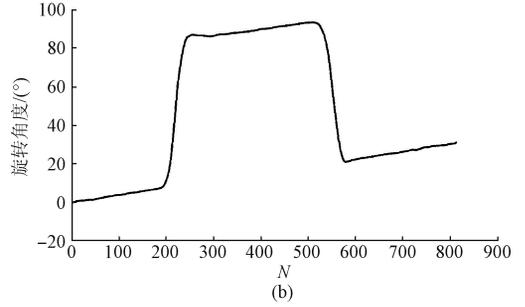
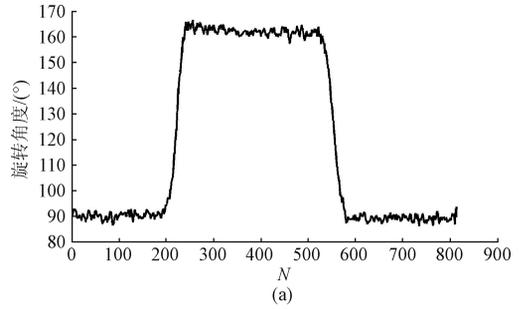


图 5 (a) 加速度传感器噪声;(b) 陀螺仪积分漂移

Fig. 5 (a) Noise from accelerometer; (b) Drift of gyroscope

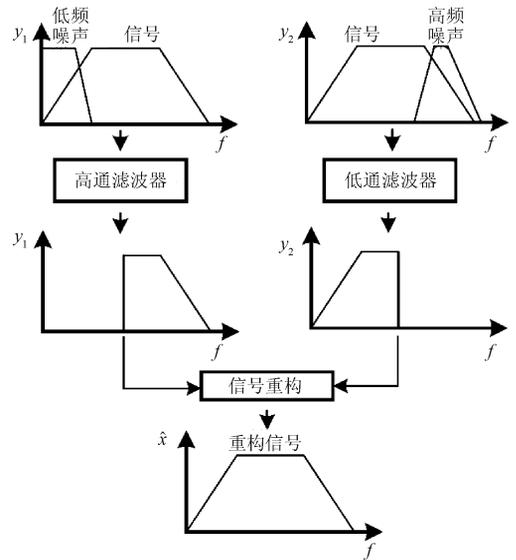


图 6 互补滤波器原理

Fig. 6 Principle of complementary filter

下条件:

$$G_H(s) + G_L(s) = 1 \quad (10)$$

互补滤波器的输出为:

$$\begin{aligned} \hat{C}(s) &= C_1(s)G_L(s) + C_2(s)G_H(s) = \\ &= (C(s) + \mu_H(s))G_L(s) + (C(s) + \mu_L(s))G_H(s) = \\ &= C(s) + G_L(s)\mu_H(s) + G_H(s)\mu_L(s) \approx C(s) \end{aligned} \quad (11)$$

图 7 所示为本文所应用的以互补滤波器为核心的传感器融合系统。 $AM(n)$  中保存着由途径 1) 获得的最新一次的头部姿态角的值;  $G(n)$  保存着最新一次陀螺仪

的数据,  $dT$  为处理陀螺仪数据的积分时间, 因此  $G(n) \times dT$  保存着由途径 2) 获得的最新一次的头部姿态角的值。 $Y(n)$  则为互补滤波器的输出, 可由如下公式计算:

$$Y(n) = FusionFactor \times [Y(n - 1) + G(n) \times dT] + (1 - FusionFactor) \times AM(n) \quad (12)$$

其中, 参数  $FusionFactor$  为互补滤波器的权值, 可以用来调整滤波器中两种途径的权重, 可由如下公式计算:

$$FusionFactor = \frac{\tau}{\tau + dT} \quad (13)$$

式中: 参数  $\tau$  为高通和低通滤波器的时间常数。这里参数  $FusionFactor$  设定为 0.9, 因为陀螺仪动态响应速度快, 因此想更多的使用来自陀螺仪的数据, 且该值为 Android 传感器数据处理中的一个经典值, 能够获得相当理想的处理结果<sup>[41-42]</sup>。

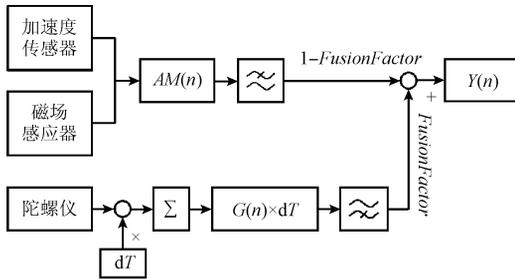


图 7 传感器融合过程  
Fig. 7 Fusion process of sensor

### 3.3 头部运动识别规则的定义

本文所涉及的 4 种控制指令: 前进、停止、左转以及右转, 分别对应着 4 种头部运动: 抬头、低头、左转头以及右转头。抬头和低头主要影响  $Pitch$  的值, 左转头和右转头则主要影响  $Yaw$  的值, 因此这里仅需考察  $Pitch$  和  $Yaw$  的值即可, 如图 8 所示。选择操作者目视前方时的头部位置作为参考位置, 将此刻的头部姿态角记为  $referPitch$  和  $referYaw$ , 而任意时刻的头部姿态角记为  $newPitch$  和  $newYaw$ 。在实际应用中, 操作者的一些不可避免的头部活动以及每次头部运动之后很难精确地回到头部的参考位置等因素会干扰到头部运动的识别, 所以必须通过选取合适的识别阈值  $T$  来应对这些因素, 头部运动识别规则如下:

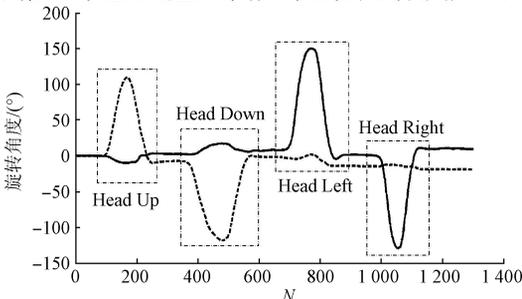


图 8 4 种头部运动的测量数据

Fig. 8 Measurement data of four kinds of head movements

$$\begin{aligned} newPitch - referPitch > T &\Rightarrow Head\_Up \\ newPitch - referPitch < -T &\Rightarrow Head\_Down \\ newYaw - referYaw > T &\Rightarrow Head\_Left \\ newYaw - referYaw < -T &\Rightarrow Head\_Right \end{aligned} \quad (14)$$

本系统将通过实验确定识别阈值  $T$  的值。

## 4 控制端的指令发送器与被控端控制器

### 4.1 Google Glass 控制端指令发送器

在 Google Glass 上使用 GDK Glassware 开发方式设计了机器人远程控制应用程序, UI 如图 1 所示, 主要实现 3 部分功能, 分别工作在不同的线程之中。

- 1) 头部运动检测线程: 负责利用互补滤波器融合加速度传感器、陀螺仪以及地磁传感器的数据来检测头部运动, 并将运动解析成控制指令, 经 WiFi 发送给机器人;
- 2) 头部位置指示线程: 负责指示操作者头部位置, 帮助操作者能够把头大致回复到参考位置;
- 3) 视频反馈线程: 负责将机器人现场视频显示在 UI 界面上, 辅助操作者做出正确的控制决策。

以上 3 个线程彼此互不干扰, 流程如图 9 所示。

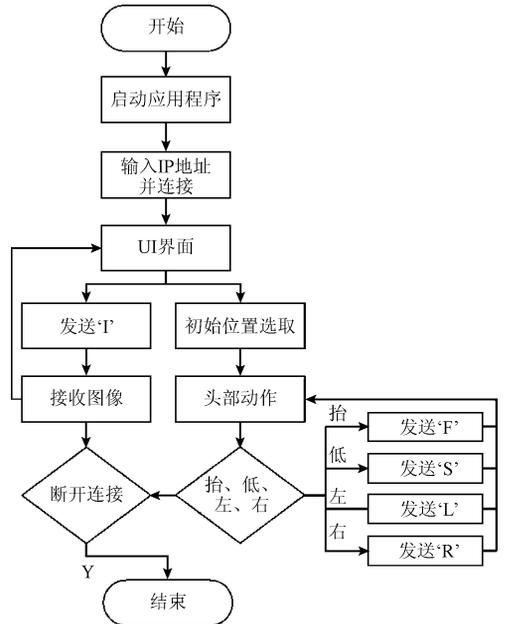


图 9 Google Glass 应用程序流程

Fig. 9 Flow chart of Google Glass APP

### 4.2 被控端机器人的控制器

在机器人端, 使用 C++ 语言为其编写控制器。该控制器在两个线程中分别实现指令的接收和动作的执行。其中, 指令的接收是通过与 Google Glass 建立 Socket TCP 通信来实现, 这里的机器人被设定为服务器端, Google Glass 则被设定为客户端。Google Glass 将控制指令以对应

的字符形式通过输出流发送给机器人,机器人接收且解析指令后,执行与该指令相对应的动作。控制器能够识别的指令有4个机器人动作的指令,包括前进(F)、停止(S)、左转(L)、右转(R);一个发送图像的指令(I)以及一个断开连接的指令(D)。机器人不断监听其所绑定的端口,以便及时获取客户端的指令,整个流程如图10所示。

### 5 实验

识别阈值的选择是头部运动检测准确性的关键,在此我们通过实验来获取一个合适的阈值。同时,为了验证本系统的灵活性和可靠性,共设计了两种避障实验,虚拟机器人穿越迷宫避障实验和真实机器人的避障实验。

#### 5.1 识别阈值选择实验

识别阈值的选择是让操作者佩戴 Google Glass 按照一组随机产生的指令做相应的头部运动。实验中,在 Google Glass 平台上设计一款应用程序,该程序在屏幕上随机显示“抬头”、“低头”、“左转头”以及“右转头”4种指令,相邻两个指令相隔5s,共进行50个头部运动。记录此期间的旋转角度并绘图,如图11所示。

从图11可以看出,操作者不可避免的头部活动和每次回到参考位置的误差在 $\pm 10^\circ$ ;每次做头部运动所产生的旋转角度绝对值均大于 $40^\circ$ ,因此识别阈值 $T$ 必须满足 $10^\circ < T < 40^\circ$ 这一条件。此外还发现在操作者进行抬头和低头运动时,不仅影响 Pitch 角的值,Yaw 角的值也产生了较大的变化,如图中点划线框所示,所以识别规则需要做如下的改进:

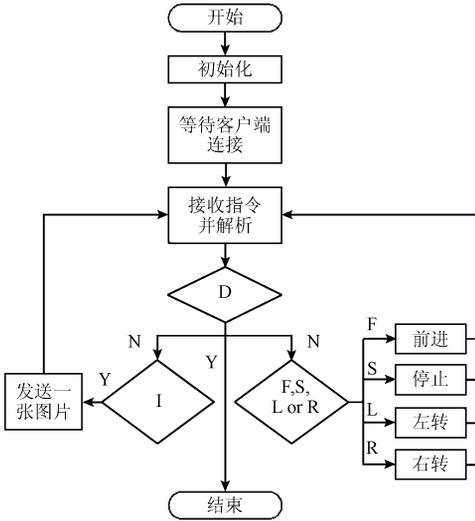


图10 机器人控制器流程

Fig. 10 Flow chart of robot controller

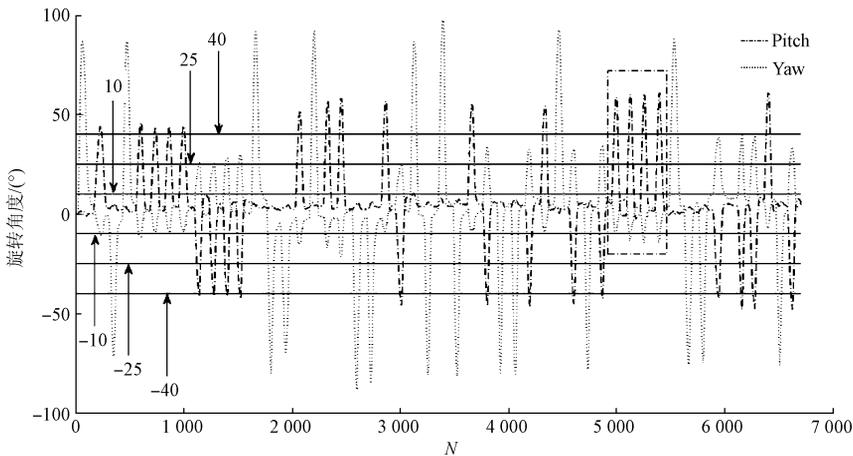


图11 识别阈值选择实验数据

Fig. 11 Experiment data of identification threshold selection

$$\begin{cases}
 newPitch - referPitch > T \Rightarrow Head\_Up \\
 newPitch - referPitch < -T \Rightarrow Head\_Down \\
 \begin{cases}
 newYaw - referYaw > T \\
 |newPitch - referPitch| < T
 \end{cases} \Rightarrow Head\_Left \\
 \begin{cases}
 newYaw - referYaw < -T \\
 |newPitch - referPitch| < T
 \end{cases} \Rightarrow Head\_Right
 \end{cases}
 \quad (15)$$

选择为 $\pm 25^\circ$ ,并将其应用于避障实验中。

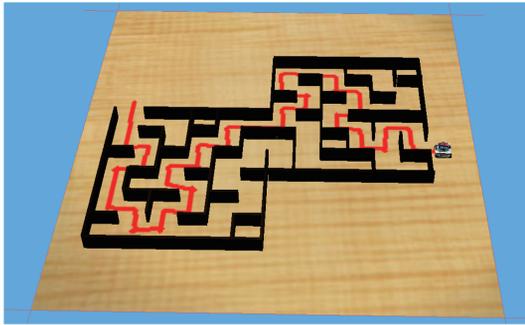
#### 5.2 虚拟机器人控制

Webots 是一款用于移动机器人建模、编程和仿真的开发环境软件。在 Webots 中,用户可以设计出各种复杂的机器人机构,在研究初期,为了减少实验的成本,更方便的验证系统,使用本系统控制 Webots 中的虚拟 SRV-1 机器人。操作者通过 Google Glass 连接机器人,连接成功后登录到遥控应用程序中,在机器人视频

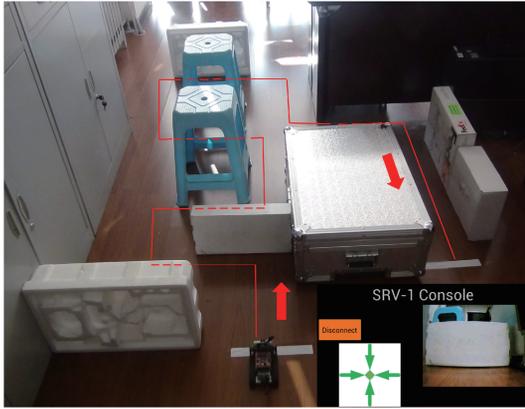
为了进一步增加识别准确率的裕量,将识别阈值  $T$

图像反馈的辅助下,分析并做出指令决策,然后通过相应的头部运动对机器人的行为进行控制。实验对机器人采取的是连续控制,即机器人接收到一个控制指令后,按照该指令的指示进行动作,直到接收到下一指令才切换动作。

在实验中,在 Webots 仿真软件中为机器人搭建了一个迷宫避障环境,来测试本系统控制机器人的性能,如图 12 (a) 所示。实验要求操作者通过 Google Glass 控制机器人按照正确路径穿越迷宫。实验进行 3 组,每组实验进行 3 次,机器人的速度分配如表 1 所示,分别记录每次实验完成后各指令的耗时以及行走路径长度,并求取平均值,如表 2 所列,图 12 (a) 中的红线是机器人完成任务后的运动轨迹。



(a)



(b)

图 12 (a) 虚拟平台实验场景; (b) 真实平台实验场景

Fig. 12 (a) Experimental scene of virtual platform; (b) Experimental scene of physical platform

表 1 虚拟环境中 SRV-1 的速度分配  
Table1 Speed distribution of SRV-1 in the virtual environment

组别	时间/(m · s <sup>-1</sup> )			
	前进	左转	右转	停止
S1	0.05	0.05	0.05	0
S2	0.1	0.1	0.1	0
S3	0.2	0.2	0.2	0

表 2 时间与路径长度

Table 2 Time and trajectory length

组别	系统	时间/s				路径长度/m
		前进	左转	右转	停止	
S1	MSF	144.24	31.22	30.72	-	7.21
	RVS	145.18	32.74	31.78	-	7.24
S2	MSF	72.23	17.04	17.13	-	7.22
	RVS	72.43	17.06	17.17	-	7.24
S3	MSF	42.40	15.42	13.91	-	8.48
	RVS	42.50	15.47	13.95	-	8.50

本实验机器人的行走速度按比例增加,控制难度也相应的增加。从表 2 中可以发现,S1、S2 和 S3 的完成任务使用的前进时间近似成比例的减少。而随着速度的增加,控制机器人转弯的难度增加的尤为明显,操作者往往难以找到合适的时机来切换指令,所以实验中操作者需要通过转弯指令调整机器人的行走方向,导致实验中随着速度的按比例增加,转弯指令的用时并没有按照比例减少,如表 2 中 S1、S2 和 S3 的左转和右转列所示。同时从表 2 的停止列发现,即使速度增加,控制难度增加,操作者在控制机器人时,还是可以不用通过停止指令来避免机器人同迷宫墙壁碰撞,可见本系统具有很高的灵活性。而三组实验中,机器人所走过的路径长度在一个合理的范围内,基本保持不变,说明本系统的具有很高的可靠性。

在相同的实验条件下,将本系统同基于旋转矢量传感器的系统进行对比。从表 2 中可以发现,在各指令的耗时以及路径长度上,本系统均有所改善。这是由于操作者头部参考位置漂移被抑制,省去了调整坐姿来抵消头部参考位置漂移所耗费的时间,使得该系统能够应用于操作者不能动的领域。

### 5.3 真实机器人控制

控制虚拟 SRV-1 机器人得到理想的实验结果后,我们进行了控制真实 SRV-1 机器人的相关实验。真实机器人实验同虚拟机器人的类似,通过 Google Glass 连接真实的 SRV-1 机器人。同时,为 SRV-1 机器人设计了实物障碍的场景,如图 12 (b) 所示。实验中,考虑到安全问题,对机器人采取非连续的控制方式,即设定机器人每接收到一个指令,就按指令的指示执行一定的时间,时间过后则停止,并等待接收下一个指令,故实验结果中并未出现停止指令。实验要求操作者需要给 SRV-1 机器人发送合适的控制指令使其避开障碍物抵达终点。

真实机器人的运动是通过左右履带的转速控制来实现运动。本文涉及机器人的直线前进、原地左转、原地右转以及停止 4 种运动。根据式(6)和(7)可知,机器人直线前进时需要设定左右履带的速度大小相等方向相同,此时运动的曲率半径为无穷大(图 13 (a));机器人的原地转动则需要设定左右履带的速度大小相等方向相反,

此时曲率半径为0(图13(b))。所以根据控制协议的规定,SRV-1机器人的行进命令格式为“Mabc”,M表示直接控制电机,a表示左轮速度,b表示右轮速度,c为持续时间 $\times 10\text{ ms}$ 。如命令“‘M’ 50 -50 20”,表示向右旋转200 ms。因此,在实验中为每个前进指令设定300 ms的执行时间,左转和右转为200 ms的执行时间。速度大小的设定如表3所示。在每种速度下,分别进行3组实验测试,将各组实验中使用每种指令的时间求平均值后作为该速度下的实验值,列于表4。

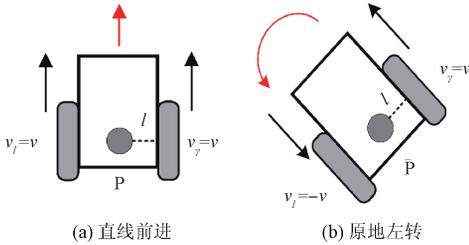


图13 机器人运动示意图

Fig. 13 Schematic diagram of robot movement

表3 真实机器人速度分配

Table 3 Speed distribution of real robot

组别	速度/%			
	前进	左转	右转	停止
S1	‘M’ 50 50 30	‘M’ -50 50 20	‘M’ 50 -50 20	‘M’ 0 0 0
S2	‘M’ 75 75 30	‘M’ -75 75 20	‘M’ 75 -75 20	‘M’ 0 0 0
S3	‘M’ 99 99 30	‘M’ -99 99 20	‘M’ 99 -99 20	‘M’ 0 0 0

表4 每种指令的耗时

Table 4 Consuming-time of every command

组别	时间/ms			
	前进	左转	右转	停止
S1	25800	3110	5120	-
S2	18600	2980	3740	-
S3	15500	2420	2630	-

本实验主要考察本系统在真实环境中应用时的性能。在3组实验中,S1、S2和S3机器人的行进速度依次增加,机器人每次行进的时间不变,所以每个指令机器人行进的路程相应的增加,导致行进路径会出现更大的偏差,在一定程度上增加了控制的难度。从表4的实验数据也可以发现随着速度的增加,各指令的耗时虽然没有按照速度的增加呈比例减少,但是各指令减少的用时稳定在一个合理的范围之内,可见本系统在真实机器人上的应用同样稳定可靠。

## 6 结论

本文成功地将穿戴式技术融合到解放双手的交互方式当中,并将其应用于移动机器人的远程控制中,为移动

机器人的远程控制提供了新的方式。本系统实现的解放双手交互方式具有如下特点。

1)同基于语音识别技术实现的解放双手交互方式相比,本系统在嘈杂的环境中不受干扰,仍然能以100%的准确率发送控制指令,而基于语音识别技术方式则无法正常运行。

2)同基于体感技术实现的解放双手交互方式相比,本系统所需的设备简单且便携,控制指令的选择也更加符合操作者日常生活习惯。

3)同基于生物电(脑电、眼电、肌电等)技术的解放双手交互方式相比,本系统所需设备体积更小,价格更低廉。操作上更能带给操作者增强现实的体验,指令识别上更加准确,抗干扰能力更强。

4)同基于触控板方式<sup>[37]</sup>相比,本系统充分考虑操作者的日常习惯。较之于Button控件选择指令,本系统实现的交互更加快捷,更加人性化。

5)本系统是将穿戴式技术应用于解放双手的交互之中,充分发挥穿戴式设备Google Glass的优势,利用其独特的显示方式和强大的信息处理能力,使得操作者在使用中更具有代入感,减轻操作者的控制负担。

本文初步将穿戴式技术应用于解放双手的人机交互方式之中,在诸多方面仍需不断优化和完善。在之后的工作中,将在以下两方面做进一步的探索。

1)将头部运动的旋转速度融合到交互之中。头部运动不仅包括旋转的角度,还包括旋转的速度,目前的系统仅使用了旋转角度这一指标,限制了控制指令的数量和形式。融合旋转角度和速度到交互方式之中将有助于解决指令数量少,运动形式单一的问题。

2)利用Google Glass其他硬件和软件资源改善本系统。Google Glass上搭载着许多其他的传感器和硬件设备,其特殊定制的Android操作系统也具有众多独有的特点,利用这些条件,改善目前系统存在的一些问题也将是下一步工作的重点所在。

## 参考文献

[1] 徐国保,尹怡欣,周美娟.智能移动机器人技术现状及展望[J].机器人技术与应用,2007(2):29-34.  
XU G B, YIN Y X, ZHOU M J. The present situation and prospect of the technologies of intelligent mobile robots [J]. Robot Technique and Application, 2007(2):29-34.

[2] CHIEN S Y, LEWIS M, MEHROTRA S, et al. Task switching for supervisory control of multi-robot teams [C]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2016.

[3] WANG H, CHIEN S Y, LEWIS M, et al. Human teams for large scale multirobot control [C]. International Conferences on Systems, Man and Cybernetics, 2009;

- 1269-1274.
- [ 4 ] 徐杰超,李伟仙,谢瑞亲,等. IKid 仿人足球机器人的自定位和球定位[J]. 电子测量技术,2016,39(6):122-125.  
XU J CH, LI W X, XIE R Q, et al. Self-positioning and soccer-positioning of IKid humanoid robots [J]. Electronic Measurement Technology,2016,39(6):122-125.
- [ 5 ] ZHANG J, LI W, YU J, et al. Virtual platform of a manned submersible vehicle carrying an underwater manipulator [C]. IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, IEEE, 2015.
- [ 6 ] LIU K Z, ZHU P Q, YANG Z, et al. Research on the control system of human occupied vehicle "Jiaolong" [J]. Chinese Journal, 2013, 58 ( S 2 ): 40-48.
- [ 7 ] HUANG P, WANG D, MENG Z, et al. Impact dynamic modelling and adaptive target capturing control for tethered space robots with uncertainties [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21 ( 5 ): 2260 - 2271.
- [ 8 ] HUANG P, ZHANG F, XU X, et al. Coordinated coupling control of tethered space robot using releasing characteristics of space tether [J]. Advances in Space Research, 2016, 57(7):1528-1542.
- [ 9 ] CARTMELL M P, MCKENZIE D J. A review of space tether research [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(1):1-21.
- [10] DHARMALE G, THAKARE V, PATIL D D. Intelligent hands free speech based SMS system on Android [C]. Proceedings of International Conference on Advances in Human Machine Interaction, Doddaballapur, IEEE, 2016:1-5.
- [11] 何侃,田亚清,李强,等. 基于 LD3320 的语音识别智能垃圾桶设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6):85-88.  
HE K, TIAN Y Q, LI Q, et al. Design of speech-recognition intelligent trash based on LD 3320 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(6): 85-88.
- [12] ALMASSLAWI D, BLOCK L, RONQUILLO C. Adoption of speech recognition technology in community healthcare nursing [J]. Studies in Health Technology & Informatics, 2016, 225: 649-653.
- [13] 于建均,门玉森,阮晓钢,等. 基于 Kinect 的 Nao 机器人动作模仿系统的研究与实现[J]. 智能系统学报, 2016,11(2):180-187.  
YU J J, MEN Y S, RUAN X G, et al. The research and implementation of behavior imitation system about Nao robot based on Kinect [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2016, 11(2):180-187.
- [14] ZHOU S, DONG Z, LI W J, et al. Hand-written character recognition using MEMS motion sensing technology [C]. Proceedings of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME, 2008:1418-1423.
- [15] CHUANG T Y, KUO M S. A motion-sensing game-based therapy to foster the learning of children with sensory integration dysfunction [J]. Educational Technology & Society, 2016, 19(1):4-16.
- [16] LI M F, LI W, ZHAO J, et al. An adaptive P300 model for controlling a humanoid robot with mind [C]. Proceedings of International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, 2013:1390-1395.
- [17] ZHAO J, MENG Q H, LI W, et al. SSVEP-based hierarchical architecture for control of a humanoid robot with mind [C]. Proceedings of Intelligent Control and Automation, IEEE, 2014: 2401-2406.
- [18] LI M F, LI W, ZHAO J, et al. Control of a Humanoid Robot via N200 Potentials [C]. Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, 2014:2395-2400.
- [19] ZHAO J, MENG Q H, LI W, et al. An OpenViBE-based brainwave control system for Cerebot [C]. Proceedings of International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE, 2013:1169-1174.
- [20] CHEN G S, SHEN D, BLASCH E, et al. Acquiring neural signals for developing a perception and cognition model [J]. Proceedings of International Society for Optical Engineering, SPIE, 2012: 83850I-83850I-9.
- [21] 支丹阳,杜秀兰,赵靖,等. 基于便携式脑电信号采集器的脑-机器人交互系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(5):694-701.  
ZHI D Y, DU X L, ZHAO J, et al. Brain-robot interaction system based on portable brain signal collector [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(5): 694-701.
- [22] VENKATARAMANAN S, PRABHAT P, CHOUDHURY S R, et al. Biomedical instrumentation based on electrooculogram ( EOG ) signal processing and application to a hospital alarm system [C]. Proceedings of International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, 2005:535-540.
- [23] USAKLI A B, GURKAN S, ALOISE F, et al. On the use of electrooculogram for efficient human computer interfaces [J]. Computational Intelligence & Neuroscience, 2010, 2010(4): 135629.
- [24] IÁÑEZ E, AZORIN J M, PEREZVIDAL C. Using eye

- movement to control a computer: A design for a lightweight electro-oculogram electrode array and computer interface [J]. *Plos One*, 2013, 8(7):e67099-e67099.
- [25] GUO X, PEI W, WANG Y, et al. A human-machine interface based on single channel EOG and patchable sensor [J]. *Biomedical Signal Processing & Control*, 2016, 30:98-105.
- [26] TAMURA H, MIYASHITA M, TANNO K, et al. Mouse cursor control system using electrooculogram signals [C]. *Proceedings of World Automation Congress*, IEEE, 2010:1-6.
- [27] ZHANG Y, ZHU X, DAI L L, et al. Forehead sEMG signal based HMI for hands-free control [J]. *Journal of China Universities of Posts & Telecommunications*, 2014, 21(3):98-105.
- [28] LI W, HU H. EMG and Visual based HMI for hands-free control of an intelligent wheelchair [C]. *Proceedings of Intelligent Control and Automation*, 2010:1027-1032.
- [29] 郭宇峰, 侯文生, 吴小鹰, 等. 假肢手恒定力量输出的诱发肌电反馈控制研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4):904-911.
- GUO Y F, HOU W S, WU X Y, et al. Feedback control of the prosthetic hand stable force output with the evoked EMG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4):904-911.
- [30] JEROUDI O M, CHRISTAKOPOULOS G, CHRISTOPOULOS G, et al. Accuracy of remote electrocardiogram interpretation with the use of google glass technology [J]. *American Journal of Cardiology*, 2015, 115(3):374-377.
- [31] RAHIMY E, GARG S J. Google glass for recording scleral buckling surgery [J]. *Jama Ophthalmology*, 2015, 133(6):710-711.
- [32] WILLE M, SCHOLL P M, WISCHNIEWSKI S, et al. Comparing google glass with tablet-pc as guidance system for assembling tasks [C]. *International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks Workshops*, 2014:38-41.
- [33] WEPPNER J, HIRTH M, KUHN J, et al. Physics education with Google Glass gPhysics, experiment app [C]. *ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, ACM, 2014:279-282.
- [34] KAPELLMANN-ZAFRA G, CHEN J, GROß R. *Using Google Glass in Human-Robot Swarm Interaction* [M]. Berlin:Springer International Publishing, 2016.
- [35] WEN X, SONG Y, LI W, et al. Rotation vector sensor-based remote control of a mobile robot via Google Glass [C]. *Robot Intelligence Technology and Applications 4*, Berlin:Springer International Publishing, 2017.
- [36] WEN X, SONG Y, LI W, et al. Rotation vector sensor-based remote control of a humanoid robot through a Google glass [C]. *IEEE, International Workshop on Advanced Motion Control*, 2016.
- [37] SONG Y, WEN X, LI W, et al. Google Glass-based remote control of a mobile robot [C]. *Sensors and Systems for Space Applications IX*, 2016.
- [38] REDDY S, WILSON K J, GOULART A, et al. On developing a mesh network of robots for hands-on undergraduate education [C]. *Frontiers in Education Conference*, IEEE, 2009:1-6.
- [39] MARTINEZ J L, MANDOW A, MORALES J, et al. Approximating kinematics for tracked mobile robots [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2005, 24(10):867-878.
- [40] NEAMTU D V, FABREGAS E, WYNS B, et al. A remote laboratory for mobile robot applications [C]. *Ifac World Congress*, 2011:7280-7285.
- [41] MILETTE G, STROUD A. *Professional Android Sensor Programming* [M]. Birmingham: Wrox Press Ltd, 2012.
- [42] 王腾, 牛桢枫. 通过互补滤波器来实现的传感器融合技术 [J]. *电脑知识与技术*. 2014, 10(5):5950-5954.
- WANG T, NIU Y F. Sensor fusion technology to achieve by complementary filter [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2014, 10(5):5950-5954.

## 作者简介



闻玺, 2013 年于太原理工大学获得学士学位, 2017 年于天津大学获得硕士学位。主要研究方向为穿戴式交互技术、智能机器人控制技术。

E-mail:wenxi203120@tju.edu.cn

Wen Xi received B. Sc. from Taiyuan University of Technology in 2013 and M. Sc.

from Tianjin University in 2017, respectively. His main research interest includes wearable technology-based HMI and intelligent robot control technology.

李伟, 现为加州州立大学贝克斯菲尔德分校教授, 主要研究方向为仿人机器人的意念控制、化学羽流追踪和智能系统设计。

E-mail:wli@csub.edu

Li Wei is professor in California State University, Bakersfield, California. His main research interest includes mind control of

humanoid robot, chemical plume tracking, and intelligent system design.

