



基于语音识别的前臂机械手实验设计

孙秀娟, 原晓澜, 王传江*, 刘春晖, 赵 瑞

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 青岛 266590)

摘要: 在“新工科”大环境下, 针对自动化类专业的实验教学, 融合科技前沿技术, 设计了基于语音识别的前臂机械手控制系统的综合实验。该实验通过语音识别实现对前臂机械手的控制, 采用 STM32F405 作为语音控制芯片。该系统采用 MPU6050 来测量手臂的三轴角速度和三轴加速度, 利用基于四元数的梯度下降法处理分析传感器数据, 确定出前臂机械手的实时位姿, 并对前臂机械手的电机进行控制, 从而在移动时能够将其手部维持在与水平面齐平的位置上, 实现了自平衡。利用 OpenMV 机器视觉模块, 在机械手执行抓取任务时, 进行抓取校正, 实现系统的闭环控制。实践证明, 在高校开展基于语音识别的机械手嵌入式控制系统实验, 符合新时期实验教学需求, 能帮助学生较好地理解和运用嵌入式平台的搭建过程, 熟练处理各种复杂的工程问题。

关键词: 前臂机械手; 嵌入式控制系统; 创新性实验; 实验教学; 新工科教育

中图分类号: G642.423

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240105

Experimental Design of a Forearm Manipulator Based on Speech Recognition

SUN Xiujuan, YUAN Xiaolan, WANG Chuanjiang*, LIU Chunhui, ZHAO Rui

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In the context of “New Engineering”, targeting the experimental teaching for automation majors, a comprehensive and innovative experiment on a speech-recognition-based forearm manipulator control system is designed. This experiment achieves control of the forearm manipulator through speech recognition, utilizing the STM32F405 as the voice control chip. The system employs the MPU6050 to measure the three-axis angular velocity and three-axis acceleration of the arm. The sensor data is processed and analyzed using a gradient descent algorithm based on quaternions to determine the real-time pose of the forearm manipulator. The motors are controlled to maintain its hand level with the horizontal plane during movement, thereby achieving self-balancing. The system utilizes an OpenMV machine vision module to perform grip correction when the manipulator executes grasping tasks, thereby achieving closed-loop control. It has been demonstrated that implementing this speech-recognition-based embedded control system experiment for manipulators in universities meets the needs of modern experimental teaching, helping students to better understand and apply the construction process of embedded platforms and to skillfully handle various complex engineering problems.

Key words: forearm manipulator; embedded control system; innovative experiment; experimental teaching; new engineering education

在日常生产和生活中, 机器人相关产品得到越来越多的应用, 因此, 机器人技术的发展也受到越来越多的关注^[1]。近年来, 我国很多高校开始重视机器人技术方面本科生人才的培养, 已经进

行了大量的机器人教学竞赛和实验, 为学生提供了更多的实践机会。文献 [2] 的 7-DOF 上肢康复机器人采用多级套索-钢丝绳传动, 具备灵活性和稳定性好的优势, 但多部件调节致维护成本高、

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 山东省人工智能赋能重点领域教学改革项目(D2024003); 山东省高等学校课程思政教学改革研究项目(SZ2023087); 山东科技大学优秀教学团队培育计划项目(TD20241005)。

作者简介: 孙秀娟, 硕士, 副教授, 主要从事嵌入式系统应用、检测技术、机器人控制等方面的教学和研究工作。

E-mail: sun8sd@163.com

* 通信作者: 王传江, 硕士, 副教授, 主要从事机器人技术等方面的教学和科研工作。E-mail: cxjwang@sdust.edu.cn

机体笨重；文献 [3] 提出的 3-DOF 气动上肢康复机器人结构轻便、输出柔和且控制稳定，但气动元件噪音振动大、响应慢；文献 [4] 又开发了 10-DOF 外骨骼式上肢康复机器人，虽然提供了近似人体上肢灵巧度的肩部结构，但是同时也增加了机械结构的复杂度；文献 [5] 上肢康复机器人系统 A6-2 通过感知外部施加在其输出轴上的力或扭矩进行相应控制和调整，但是系统具有强刚性，无法满足舒适性、穿戴便捷性、运动灵活度性的需求。相较于现有研究，本文设计的前臂假肢机械手采用轻质材料与精简构件实现轻量化设计，符合人体工程学以提升穿戴舒适性，适配教学实验平台需求。实验平台旨在培养学生将理论联系实际，提升实践操作能力。该实验为语音模块搭建了相应的硬件平台^[6]，并且确定了控制系统相应硬件构成，完成手部保持自平衡、关闭自平衡、抬起手臂、落下手臂、手臂向内向外转动、抓取物体、打开手部、闭合手部等动作。该实验系统由 3 个自由度组成：手部 1 个自由度能够完成手部的张开和闭合的动作；手臂部 2 个自由度能够完成上下旋转、左右旋转、内外转动等动作^[7]。面向控制专业的学生开设了基于语音识别技术的前臂机械手的嵌入式控制系统设计实验，该实验帮助学生快速掌握以 STM32 为嵌入式平台的假肢机器人控制系统，能够加强学生对假肢机器人功能实验的理解，培育创新实践人才^[8-9]。

1 实验平台总体设计

该实验平台控制系统的硬件包括：主控单元、惯性测量模块、语音识别模块、电源模块、RS485 模块等电路，整体框架示意图如图 1 所示。

在前臂假肢机械手中，STM32F103 主要用于低级信号采集和初步处理，STM32F405 作为语音芯片，负责更复杂的语音信号处理和决策。实验过程中假肢机器人手臂部位的传感器选用惯性测量模块 MPU6050，用于检测运动状态并输出惯性数据以供后续进行实时的姿态解算，使手部在运动过程中能够一直保持水平姿态，实现自平衡功能。另外，OpenMV 作为一个嵌入式机器视觉模块，在机械手执行抓取任务时，实时调整手爪力度和角度，以适应不同大小和形状的目标物体，

进行抓取校正，实现系统的闭环控制。软抓取时，选择使用以 PVDF 材料为基础的滑觉传感器和 A301 薄膜压力传感器，通过测验，调节机器人手部的抓握力度和抓握状态，完成前臂假肢手对目标物的软抓取功能。机械部分构造如图 2 所示。

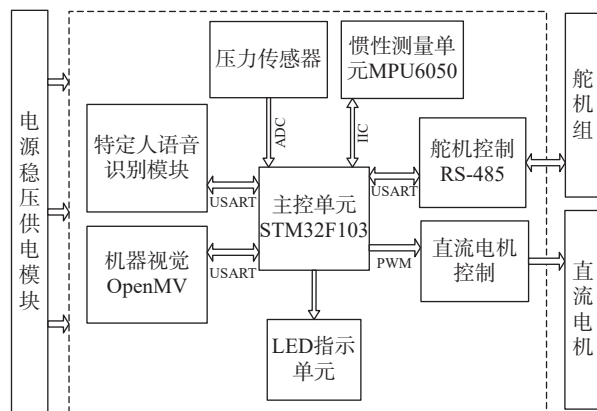
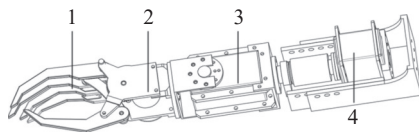


图 1 系统总体框架图



1—手部；2—手部电机；3—手腕控制舵机；4—手臂控制舵机

图 2 前臂机械手机械部分构造图

2 语音识别实验设计

语音识别技术拥有很长的发展历史，其原理十分成熟，并且在控制系统中的应用拥有很高的使用可靠性^[10-12]。实验平台选用特定的语音指令控制前臂机械手。学生需要把音频文件转换成数字信号，再把背景噪音去掉。因为端点检测属于时间域的分析，不要求加窗，也不要求预加重，所以学生只需要在分帧后和预加重前进行端点检测。教师引导学生了解语音识别的基本流程，为后续的学习奠定基础。

为本实验开发的特定语音模块最终接入 STM32 嵌入式开发平台，将采集到的数字信号进行数据处理。语音识别模块主要是把接收到的语音信号转换成数字信号，然后输入到主控单元进行处理分析。在提高语音识别的准确性上，是否采集到有效的语音信号是个关键点^[13]。在实验平台上，采用先升后降的方法，降低了电源的噪声，提高了语音质量，提高了电路的功率稳定

性。在该实验系统中, 选择 FP6291 作为升压电路的控制芯片, 选择 SP6205 作为降压电路的控制芯片。该实验可锻炼学生自行设计升压降压电路的能力, 引导学生了解目前各种主流单片机的特点, 选择适合实验的具体单片机型号, 以及熟悉嵌入式平台控制系统的设计流程。

3 手部自平衡实验设计

在手部抓取自平衡的实验中, 主要内容是对位于手臂部的惯性测量模块 MPU6050 检测到的惯性数据先进行实时的解算, 根据解算出的姿态角, 计算出机械手的手部与水平线的偏移角度值, 然后控制舵机的转动, 使其接近于零, 最终使手在移动中始终保持水平的姿态。该实验平台能在学生实际操作中加强其对 MPU6050 姿态传感器工作原理、应用场景和实际作用的了解和掌握, 对所学理论知识进行实际综合运用。

前臂假肢机械手以接收到的语音信号作为控制指令, 在实验过程中, 学生需要向其发送语音命令。在该语音信号的处理中语音识别模块会对语音命令检测和评估, 并将识别结果经过串口传送到底层主控单元, 主控单元会以识别结果为依据对相应的电机进行不同的控制, 完成机械手手部的自平衡等动作。此外, 需要通过对实验环境进行优化调整来减少干扰因素的影响, 要求学生基于四元数的梯度下降法进行姿态解算, 并与传统加速度计和陀螺仪数据融合方法进行对比; 利用不同传感器组合来分析姿态估计的准确性; 通过 MATLAB 仿真验证解算算法的误差, 并与实测数据进行比对和分析; 采用手动操作的方式来完成实验任务。

这些方法确保了实验结果的可靠性, 同时提高了学生对不同数据融合技术的理解。

3.1 姿态解算算法的应用

在实验平台中, 姿态解算算法基于 MPU6050 采集的加速度和角速度数据, 并采用四元数梯度下降法进行数据融合和滤波。首先, STM32 通过 I2C 读取传感器数据, 并对原始数据进行归一化处理; 其次, 利用四元数表示机械手的空间姿态, 并基于梯度下降优化算法不断修正误差, 提高姿态估计的精度; 最后, 将计算得到的姿态角数据传输至控制系统, 并结合语音指令和视觉信息调

整机械手的动作。该方法具有计算效率高、抗干扰能力强的特点, 适用于实时姿态控制。

3.1.1 坐标变换

本实验旨在锻炼学生对“机器人学”课程中的运动学逆解问题的认识和把握, 学习和应用坐标变换与推导。如图 3 所示, $O-X_cY_cZ_c$ 可以通过坐标系 $O-X_aY_aZ_a$ 围绕 Z 轴旋转 θ 角度来获得。将矢量 r 分别投影到两个坐标系中, 可以发现, 在坐标系 $O-X_cY_cZ_c$ 上的投影是 $[r_{x_c} r_{y_c} r_{z_c}]^T$, 在坐标系 $O-X_aY_aZ_a$ 上的投影是 $[r_{x_a} r_{y_a} r_{z_a}]^T$, 所以 $r_{z_a} = r_{z_c}$ 。

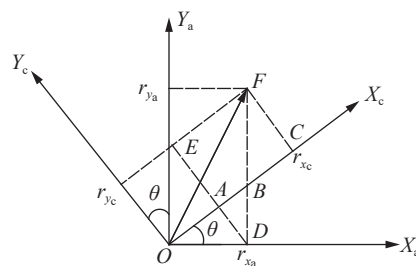


图 3 坐标系 $O-X_aY_aZ_a$ 和坐标系 $O-X_cY_cZ_c$ 之间关系图

采用矩阵形式表示上图关系得公式:

$$r_c = C_a^c r_a \quad (1)$$

$$r_a = \begin{bmatrix} r_{x_a} \\ r_{y_a} \\ r_{z_a} \end{bmatrix}, r_c = \begin{bmatrix} r_{x_c} \\ r_{y_c} \\ r_{z_c} \end{bmatrix}, C_a^c = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

坐标系 $O-X_aY_aZ_a$ 可通过式(1)转换成坐标系 $O-X_cY_cZ_c$, 在这当中, 矩阵 C_a^c 就是从坐标系 $O-X_aY_aZ_a$ 转化为坐标系 $O-X_cY_cZ_c$ 的变换矩阵^[14-16]。

3.1.2 前臂假肢手姿态矩阵的构建

在姿态解算的过程中, 通过大量的实验和数据分析后, 最重要的部分就是要求得到横滚角与俯仰角, 在这个系统中, 使用了地理坐标系(g系)和载体坐标系(b系)。

如图 4 所示, 建立一个地理坐标系 $O-X_gY_gZ_g$, 以前臂假肢重心为原点, 有三条轴线, 分别是 Z_g 轴垂直天空, Y_g 轴垂直北方, X_g 轴垂直东方。 $O-X_bY_bZ_b$ 形成载体坐标系, 其原点在前臂假肢的重心处, 三轴分别是 X_b 轴朝向前臂假肢右侧, Y_b 轴朝向前臂假肢轴向, Z_b 轴朝向垂直于前臂假肢该身向上。其中, $O-X_bY_bZ_b$ 可由 $O-X_gY_gZ_g$ 围绕不同的坐标轴线进行旋转来获得。

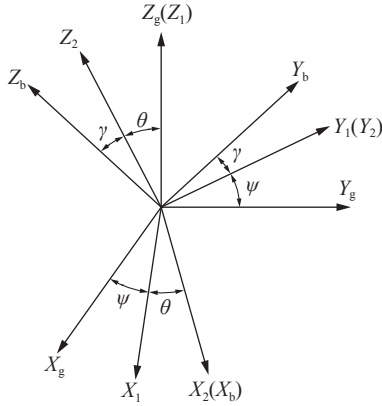


图 4 地理坐标系和载体坐标系转换图

3.2 前臂假肢系统姿态解算方法

通过对四元数法的分析,得出的四元数算法简单、计算量小,能较好地解决实际应用中的实时性要求。四元数具有 4 个参量,可以被用来刻画前臂假肢围绕任何轴线的转动,它们由 1 个实部分和 3 个虚部分构成,其形式为 $q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k$,四元数法要求在计算出四元数数据后需要进一步经过归一化处理。

其中四元数的微分方程是:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将加速度计测得的实际重量向量与 $(v_x, v_y, v_z)^T$ 做叉乘,得到误差向量。

$$\begin{aligned} e_x &= a_y v_z - a_z v_y \\ e_y &= a_z v_x - a_x v_z \\ e_z &= a_x v_y - a_y v_x \end{aligned} \quad (6)$$

通过 PI 运算对上述的误差向量计算,达到修正陀螺仪的目的^[19]。

$$\delta = K_p e + K_I \int e \quad (7)$$

$$\omega = \omega_g + \delta \quad (8)$$

将上式(8)所得 ω 替换式(3)中的 ω_g , 得

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \cdot \omega \quad (9)$$

采用一阶龙格-库塔算法和修正的陀螺仪数值 ω 对 4 个参数进行数值计算并不断更新,一阶龙格-库塔算法表达式如下:

$$q(t+T) = q(t) + T \dot{q}(t) \quad (10)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \cdot \omega_g \quad (3)$$

展开写成矩阵形式:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{gx} \\ \omega_{gy} \\ \omega_{gz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,四元数的四参数的更新可以在微分方程中完成^[17]。式中, ω_g 为陀螺仪实时估算的角速率。经过分析,当前臂假肢手在复原到原始姿态并将其置于工作台上时,其俯仰角和横滚角的最优输出是 0° , 这会引起陀螺的飘移,且由俯仰角和横滚角引起的误差将不断累积。因此,应该采取有效措施来确保其准确性和稳定性。为了克服陀螺仪随机漂移的问题,提出了一种采用互补滤波算法把加速度计和陀螺仪的数据信息相融合的方法^[18]。根据式(4)和前臂假肢手的起始位姿角度,能在四元数中获取 4 个初始参数。把在 $O-X_g Y_g Z_g$ 下的重力向量 $(0,0,1)$ 变换成在 $O-X_b Y_b Z_b$ 中。

即:

$$\begin{aligned} q_0(t+T) &= q_0(t) + \frac{T}{2} [-\omega_x q_1(t) - \omega_y q_2(t) - \omega_z q_3(t)] \\ q_1(t+T) &= q_1(t) + \frac{T}{2} [\omega_x q_0(t) - \omega_y q_3(t) + \omega_z q_2(t)] \\ q_2(t+T) &= q_2(t) + \frac{T}{2} [+ \omega_x q_3(t) + \omega_y q_0(t) - \omega_z q_1(t)] \\ q_3(t+T) &= q_3(t) + \frac{T}{2} [\omega_y q_1(t) - \omega_x q_2(t) + \omega_z q_0(t)] \end{aligned} \quad (11)$$

经更新的四元数从(11)式中得到后,横滚角与俯仰角可以用姿态矩阵 M 进行更新:

$$M = C_g^b = \begin{bmatrix} (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(12)可以得出横滚角与俯仰角。

横滚角:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{M_{23}}{M_{33}}\right) \quad (13)$$

俯仰角:

$$\theta = -\arcsin(M_{13}) \quad (14)$$

根据得到的横滚角与俯仰角, 计算出前臂假肢的位姿, 再由 STM32 底层控制板进行运算, 将控制命令发送给舵机, 完成了手部的自平衡。

4 前臂假肢手部搭建与实验

4.1 前臂假肢手部的搭建

前臂假肢控制系统包括: 电源系统、底层控制板、舵机与电机及其驱动电路、外部传感器等硬件, 应用语音识别系统控制前臂假肢机械手运动。

底层控制板为下位机, 它包括了底层控制芯片和它的外围电路, 通信协议转化电路(串口 TTL 电平转化 RS-485 电平)与电源电路等。通过舵机运动可以让整个系统的各个关节得到高效的配合。用直流电机来操纵手部张开和闭合, 通过 MPU6050 传感器, 可以获取前臂假肢机械手姿态的动态信息从而使整个系统具有良好的手部自平衡性。电源模块给全机提供电力, 保证了系统的正常运转。

4.2 手部自平衡功能实验

手部抓取自平衡, 就是当前臂假肢机械手拿持物体时, 其挥舞、转动等运动都不会对手部与地面之间的平衡产生任何影响。现场实物实验测试如图 5 所示。

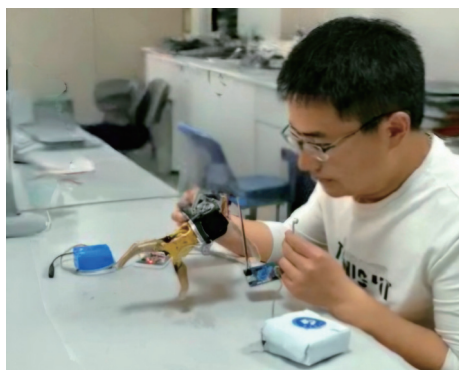


图 5 现场实物实验测试图

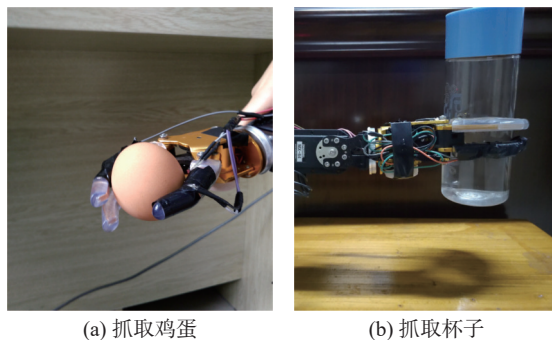
4.3 软抓取实验

实验提出, 在对易碎物体进行软抓握的过程中, 既要确保抓握时不会损坏物体的整体结构, 又要保证稳定准确地抓握物体。本实验利用 A301

压力感应器对前臂假肢抓握过程中双手与被抓握对象的接触程度进行判断。A301 压力传感器是一种质量小、蠕变性好、感应区域小的薄膜压力传感器, 这种特性使它很容易安装在假肢手的手指上。A301 压力传感器输出的是一种相对微弱的模拟信号, 如果不经处理直接输送到 STM32 底层控制板上的模拟—数字转换(analog-digital conversion, ADC), 那么检测结果将会产生较大的误差, 所以要求学生对信号进行处理放大, 设计适合的信号调理电路。STM32 中内置有 ADC, 可以把输出电压给变换成数字信号, 当软抓取时, 该数字信号随压力的增大而增大。当数字信号大于一定阈值, 则说明假肢手已经触碰到了目标物体, 这时前臂假肢手部会停止抓取并实现软抓取功能。

4.4 滑觉传感器

在该系统中, 考虑到手的位置的限制, 选择的传感器是以 PVDF 材料为基础的滑觉传感器。PVDF 压电薄膜能够按照需要制成不同的形状, 从而按照机械手手部的形状, 选取一款 2 cm×1 cm 的条形 PVDF 滑觉传感器。将传感器贴在机械手的手指之前, 通过在其顶部和底部粘上增加摩擦力的橡胶皮, 以增加抓取的物体和滑觉传感器之间的摩擦, 以及 PVDF 压电薄膜在横向压缩和纵向挤压时产生的形变量。进行手部软抓取实验, 目标物体是鸡蛋时, 实验结果如图 6(a)所示, 目标物体是杯子时, 实验结果如图 6(b)所示, 它可以同时抓取易碎和坚硬的物体, 继而可以有效完成前臂假肢机械手的软抓取动作。



(a) 抓取鸡蛋

(b) 抓取杯子

图 6 抓取实验结果图

5 结束语

实验平台从人语音识别和前臂机械手方面论述了系统的设计思路, 利用基于四元数的梯度下

降法对采集到的数据处理分析, 经过样机实验和测试, 通过手部动作调试和测试方法的改进、软件算法的不断优化, 最终实现自平衡和软抓取的特色功能。本实验是一个综合性实践项目, 前臂机械手嵌入式控制平台的设计能够让学生快速掌握以 STM32 为嵌入式平台的假肢机器人控制系统, 将已学各相关课程的专业知识融会贯通, 学会理论联系实际。引导学生了解电机的结构和工作原理, 加强学生对假肢机器人功能实现的理解, 提高学生自主学习、自主设计和工程应用的能力。整个实验内容丰富, 结合新时期实验教学的需求, 与前沿技术高度相关、紧密结合, 对高校本科生或研究生的新工科教学改革具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 王进, 赵春鱼, 朱琦, 等. 高校机器人竞赛指数设计、建模与分析[J]. 高等工程教育研究, 2022(5): 157-163.
- [2] 张立勋, 杨勇, 张今瑜. 手臂康复机器人阻抗控制实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008(1): 69-72.
- [3] CHEN WB, XIONG C, SUN R L. A 10-degree of freedom exoskeleton rehabilitation robot with ergonomic shoulder actuation mechanism[J]. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2011, 8(1): 47-71.
- [4] 何畅. 类人上肢康复机器人的拟人运动生成与人机交互控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [5] 申京玉. 上肢康复机器人的设计与研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [6] 王辉, 于立君, 胡建, 等. 智能移动服务机器人实验教学平台研究[J]. 实验室科学, 2020, 23(6): 98-101.
- [7] 李海源, 刘畅, 严鲁涛, 等. 上肢外骨骼机器人的阻抗控制与关节试验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 200-209.
- [8] 朱海荣, 吴瑜. 基于工程教育专业认证的机器人创新实验平台开发[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(11): 32-37.
- [9] 高波, 霍凯, 陈羽, 等. 新工科背景下提升学生创新实践能力的探究[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(6): 178-181.
- [10] 陈志博, 王思雨, 刘远泽, 等. 一种基于改进多带谱减法的低信噪比语音识别方法[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2022, 55(6): 58-61.
- [11] ABDUSALOMOV A B, SAFAROV F, RAKHIMOV M, et al. Improved feature parameter extraction from speech signals using machine learning algorithm[J]. *Robotics & Machine Learning Daily News*, 2022, 22(21): 8122.
- [12] 蔡青竹. 基于人工智能的语音识别分析[J]. 集成电路应用, 2020, 37(9): 6-7.
- [13] 杨震, 王婷婷. 语音图信号处理理论与技术研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2020, 40(5): 43-51.
- [14] 柏植, 凌六一, 韩涛, 等. 小型无人机姿态稳定性控制研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(11): 16-20.
- [15] 章孝, 李智, 王勇军. 无人飞行器姿态稳定性优化控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(12): 49-54.
- [16] LI R, CUI X L, LIN J C, ZHENG Y H. An attitude measurement method of industrial robots based on the inertial technology[J]. *Robotica*, 2022, 40(8): 2909-2931.
- [17] 吕东, 王虹, 张萌, 等. 基于 MEMS 器件的捷联惯性导航定位方法研究[J]. 微波学报, 2021, 37(S1): 233-236.
- [18] 黎星华, 刘晓平, 王刚, 等. 一种自适应混合滤波姿态解算算法[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(3): 79-86.
- [19] 刘洲, 单修洋, 谭芳. 自适应显式互补滤波在六旋翼飞行器中的应用[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(5): 157-160.

编辑 钟晓