

下肢外骨骼安全测试平台软件系统设计

燕飞雨¹, 王多璿^{1,2*}

¹上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

²上海康复器械工程技术研究中心, 上海

收稿日期: 2024年11月14日; 录用日期: 2024年12月20日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

为实现下肢外骨骼安全测试平台运行状态数据的可视化,采用面向对象的 C++编程语言设计了基于 Qt 图形库框架的上位机软件,该软件对接收到的运动数据进行处理分析,实现了运动参数检测、足底压力分析、Z 轴垂直质心变化检测等功能。基于模糊网络分析法提出了对于下肢外骨骼安全性的评价方法,使用多传感器系统采集数据计算指标,以定量的方式得到综合评价结果。首先,介绍了自主设计的双下肢外骨骼安全测试硬件平台的结构和原理以及软件实现过程;然后,介绍了上位机软件的功能以及设计和实现过程;最后,以下肢外骨骼安全测试平台为实验对象,验证了所设计的上位机软件的有效性。

关键词

Qt平台, 下肢外骨骼, 安全评估, 软件设计

Software System Design of Lower Limb Exoskeleton Safety Test Platform

Feiyu Yan¹, Duojin Wang^{1,2*}

¹School of Health Sciences and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Engineering Research Centre of Assistive Devices, Shanghai

Received: Nov. 14th, 2024; accepted: Dec. 20th, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

To achieve the visualization of operational status data for the lower limb exoskeleton safety testing platform, an upper computer software was designed using object-oriented C++ programming language and based on the Qt graphics library framework. The software processes and analyzes the received motion data, implementing functions such as motion parameter detection, foot pressure

*通讯作者。

文章引用: 燕飞雨, 王多璿. 下肢外骨骼安全测试平台软件系统设计[J]. 软件工程与应用, 2024, 13(6): 824-834.
DOI: 10.12677/sea.2024.136085

analysis, and detection of the vertical center of mass (COM) changes along the Z-axis. A safety evaluation method for the lower limb exoskeleton was proposed based on fuzzy network analysis. This method uses a multi-sensor system to collect data and calculate indicators, obtaining a comprehensive evaluation result in a quantitative manner. First, the structure and principles of the self-designed lower limb exoskeleton safety testing hardware platform, as well as the software implementation process, are introduced. Then, the functions of the upper computer software, along with its design and implementation process, are described. Finally, the effectiveness of the designed upper computer software is verified by conducting experiments on the lower limb exoskeleton safety testing platform.

Keywords

Qt Platform, Lower Limb Exoskeleton, Security Assessment, Software Design

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

根据国家统计局 2023 年发布的数据,我国 65 周岁及以上老年人口占比达到 22.5% [1],人口老龄化带来的健康问题也日益严重,这也导致相关康复治疗的需求日益上升,而下肢外骨骼机器人在这种时代背景下应运而生,作为当下研究的热点,其在帮助下肢功能障碍者方面有着巨大的潜力,且发展十分迅速,国内外已经出现了许多辅助截瘫患者进行日常活动和康复训练的可穿戴下肢外骨骼机器人[2],如 Ekso [3]、ReWalk [4]、ALEX-I [5]、WPAL [6]、HAL [7]、Indego [8]、Fourier X2 [9]和 Ailegs [10]等。

作为以穿戴者为中心,直接与患者进行交互的医疗设备[11],下肢外骨骼机器人在人机交互过程中的安全性理应放到首位[12],目前国内外研究人员对于此也都给出了不同的答案。

G. Zeilig 等通过召集志愿者对 ReWalk 在脊髓损伤患者使用过程中的安全性、耐受性及助力性进行评估[13],Torricelli 等设计了一个通过识别在使用过程中记录的安全指标测试下肢外骨骼安全性的平台[14],祝敏航等提出了基于机器视觉的下肢外骨骼运动检测系统,以实现对外骨骼的有效性进行量化评估[15],陈伟海等提出了用于步行辅助的被动下肢外骨骼并进行实验以验证外骨骼在关节辅助力矩方面的性能[16]。

这些研究大多是通过临床试验对受试者进行定性分析,或基于受试者或单一指标进行测试和风险评估,具有一定的局限性,且对外骨骼性能进行综合评价的研究仍然较少,部分指标的构建不能很好地表征外骨骼装置的使用安全性。

考虑到下肢外骨骼机器人的多样性和复杂性,本文设计了一种基于通用下肢测试平台的软件系统,测试平台通过模拟真实的人体条件,使用多传感器采集外骨骼机器人在运动过程中的数据并发送至上位机,上位机系统集成多种功能,动态可视化实时显示运动参数检测数据、足底压力数据、Z 轴垂直重心变化等,最后使用模糊网络分析法,定性与定量地对下肢外骨骼机器人运动过程中的安全性进行评估。

2. 下肢外骨骼安全测试平台设计

2.1. 机械结构设计

本文提出的上位机软件的实验对象是下肢外骨骼安全测试平台。平台整体结构如图 1 所示,由下肢模块和躯干模块组成。各部分的尺寸参照国家标准 GB/T 10000-1988《中国成年人人体测量尺寸》中的参

数进行设计，内部嵌入了传感器系统和驱动电机，以模拟真实的人体工作环境。

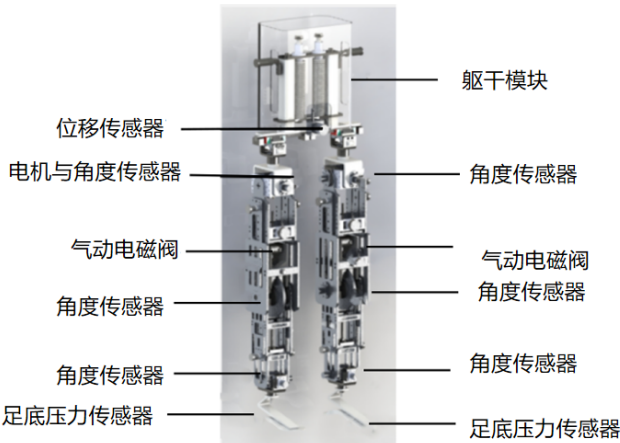


Figure 1. Mechanical structure of the test platform
图 1. 测试平台机械结构

2.2. 下位机设计

根据上述实验假人的机械结构，设计下位机系统用于接收和传输传感器数据以及接收上位机的指令。选用 STM32 系列芯片作为主控芯片，实物图见图 2，通过对硬件模块的相关配置，实现传感器信号采集与传输、上下位机通信等功能。数据采集通过 Modbus 协议进行通信，使用串行端口传输数据。数据从硬件端传输到上位机，然后保存到数据库，从而实现下肢外骨骼安全测试平台运动数据的采集、传输、可视化存储。

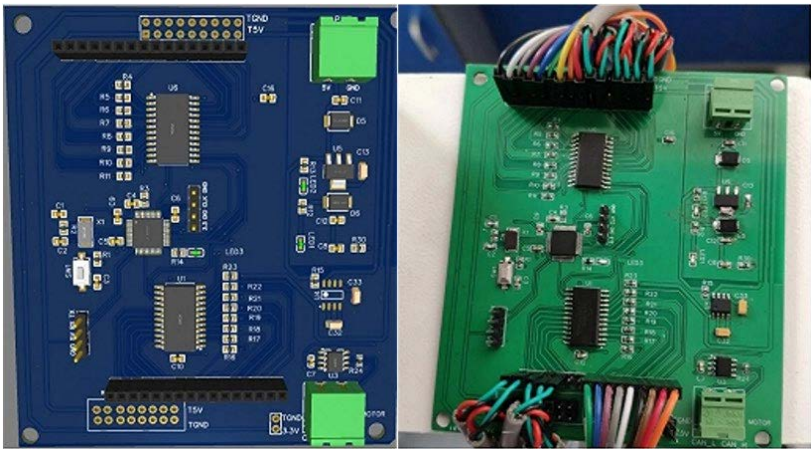


Figure 2. PCB board of the main control module
图 2. 主控模块 PCB 板

3. 上位机软件系统设计

3.1. 系统总体框架设计

上位机软件基于 Qt Creator 开发，使用面向对象的 C++语言，其独特的信号与槽机制可确保对象间参数传递的正确性，适用于处理和显示下位机发送的运动数据。上位机软件运行界面如图 3。在软件运行

的过程中考虑有多个界面，需要实现界面切换的功能。建立多个设计师界面类，以其中一个 QWidget 容器作为父界面存放 QStackedWidget 类，其余的为子界做提面升，通过构造函数实例化页面窗口类，并将子界面添加到主界面布局中，设置主界面上不同按钮的点击后发出的信号，以及 Widget 类中相应的切换操作，实现界面的切换。

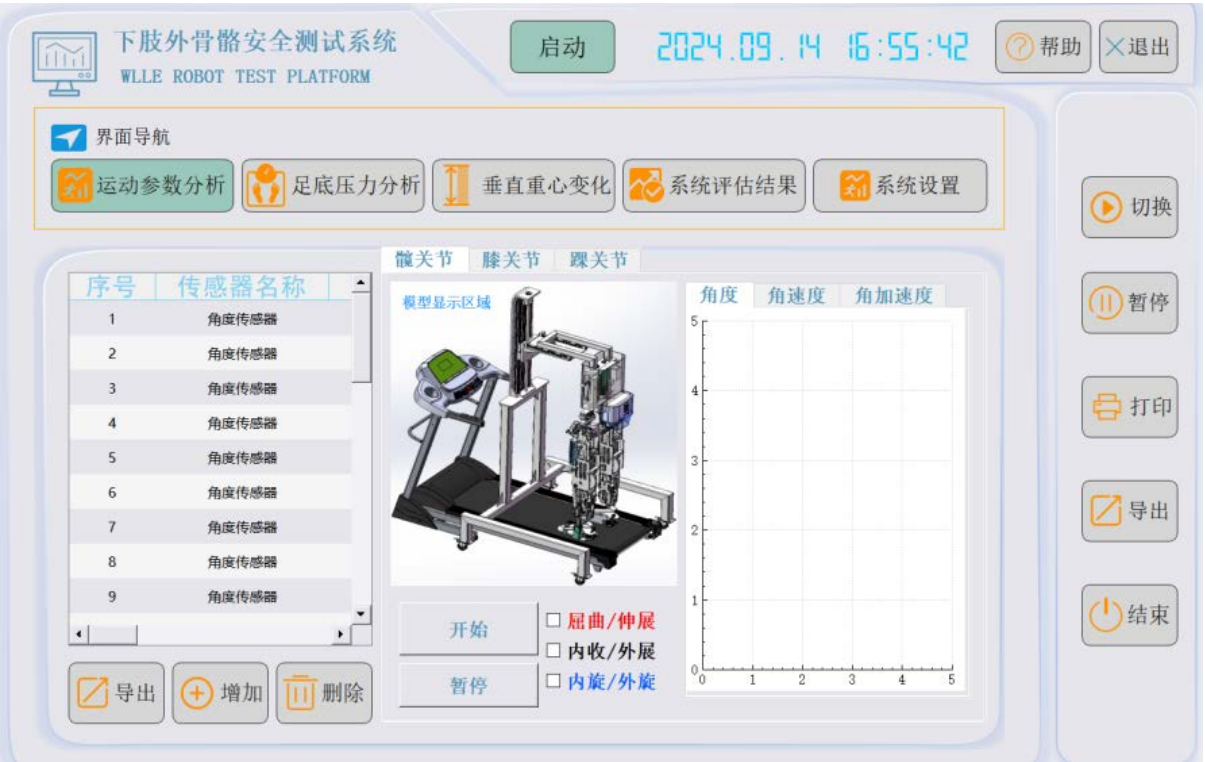


Figure 3. The upper computer software running interface
图 3. 上位机软件运行界面

软件包括四个主要功能界面：运动参数显示界面、压力中心(COP)轨迹和足底压力界面、垂直重心显示界面和测试结果显示界面，详见表 1。

Table 1. Functions of the software
表 1. 上位机功能

主界面	具体功能
运动参数检测	显示各个关节运动过程中的角度、角速度和角加速度的变化
足底压力分析	呈现并分析足底压力测量值的变化
垂直重心位移量	显示垂直重心变化的位移
安全测试结果	评估安全评估结果并生成相关报告

3.2. 串行通信模块

使用串口通信方式来完成上位机软件与下位机硬件的数据通信，数据包包含有一个起始位，5 到 9 个数据位，一个可选的奇偶检验位以及一个或两个停止位，设备开启后，上位机会自动识别已连接端口的端口名，并在参数设置区进行参数设置，各参数设置如表 2 所示。

Table 2. Serial communication parameters
表 2. 串行通信参数

名称	参数设置
数据位	8
停止位	1
校验位	None
波特率	115200
串口号	COM1

3.3. 数据显示模块

上位机通过与下位机通信，实时获取安全测试平台中各个传感器的数据，将正在检测的数据以适合的方式显示在 UI 界面上，例如折线图、波形图或者热力图等，并实时更新，使使用者更直观地了解数据变化趋势。对于读取到的数据，上位机还应具备分析功能，并将分析结果呈现在测试结果显示界面。

3.3.1. 运动参数界面

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\phi}{t1-t0} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{t1-t0} \tag{2}$$

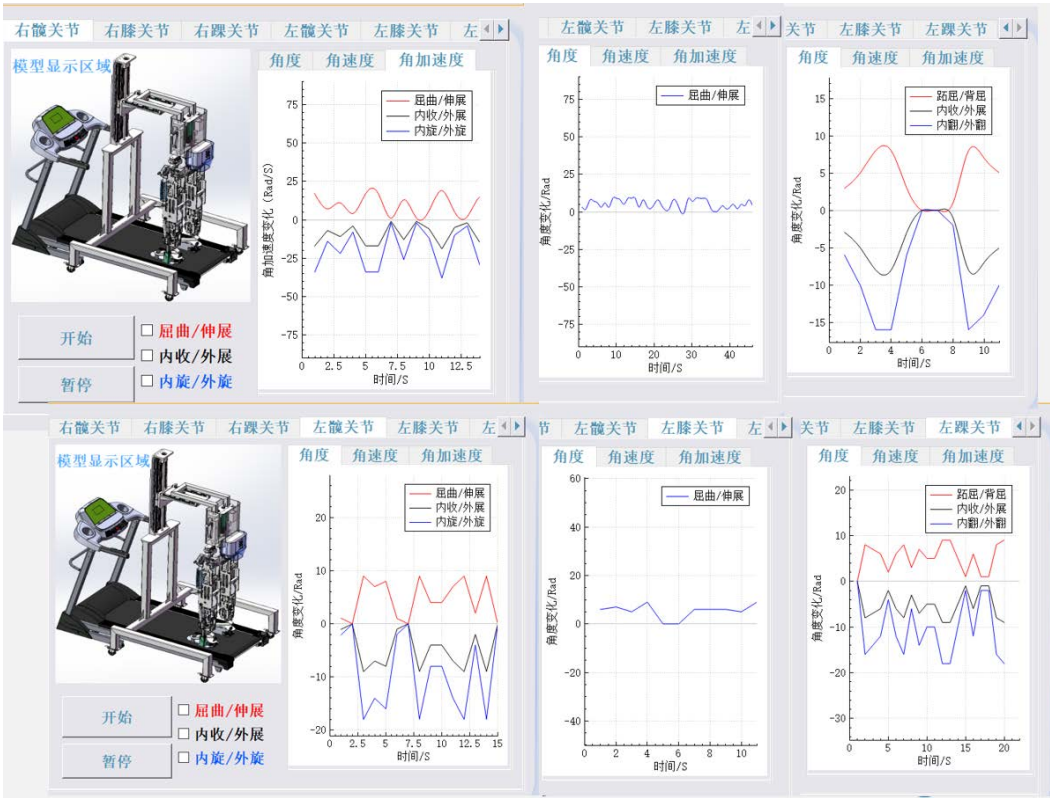


Figure 4. Motion parameter detection interface
图 4. 运动参数检测界面

运动参数界面主要记录的是测试平台对于各个关节在运动过程中的数据变化, 主要包括角度、角速度、角加速度, 外骨骼主动驱动关节的驱动力矩。角速度变化 $\Delta\Phi$ 与角加速度变化 α 的计算由公式(1)、(2)得到, 运动参数检测页面如图 4 所示。为了更好地反应运动数据变化的周期性与趋势, 使用 Qt 的 `qcustomplot` 模块将运动数据绘制成曲线图, 使用 `addgraph()` 函数添加多条曲线图层, 设置一个 30 ms 定时器的槽函数通过修改 X 轴时间的显示范围和刷新图像实现数据的实时动态刷新。

3.3.2. 足底压力分析界面

选择使用压力分布图显示足底压力。为了解决数据采集过程中可能出现的干扰和噪音, 采用过滤算法对数据进行去噪处理。去噪后的足底压力数据首先进行灰度映射, 然后进行伪彩色处理与 RGB 映射将不同的压力值映射为不同的颜色, 最后用插值算法将不同颜色的离散像素转换为连续的压力分布图。这种方法能让用户直观地观察到足底压力的实时变化(见图 5)。

COP 轨迹图中坐标点的计算公式见公式(3)和(4)。其中, $pressure(x_i, y_i)$ 是在坐标为 (x_i, y_i) 的压敏元件上测得的分布力大小, (x_i, y_i) 是压敏元件在 x 和 y 方向上的坐标。

$$COP_x = \frac{\sum (pressure(x_i, y_i) \times x_i)}{\sum (pressure(x_i, y_i))} \quad (3)$$

$$COP_y = \frac{\sum (pressure(x_i, y_i) \times y_i)}{\sum (pressure(x_i, y_i))} \quad (4)$$

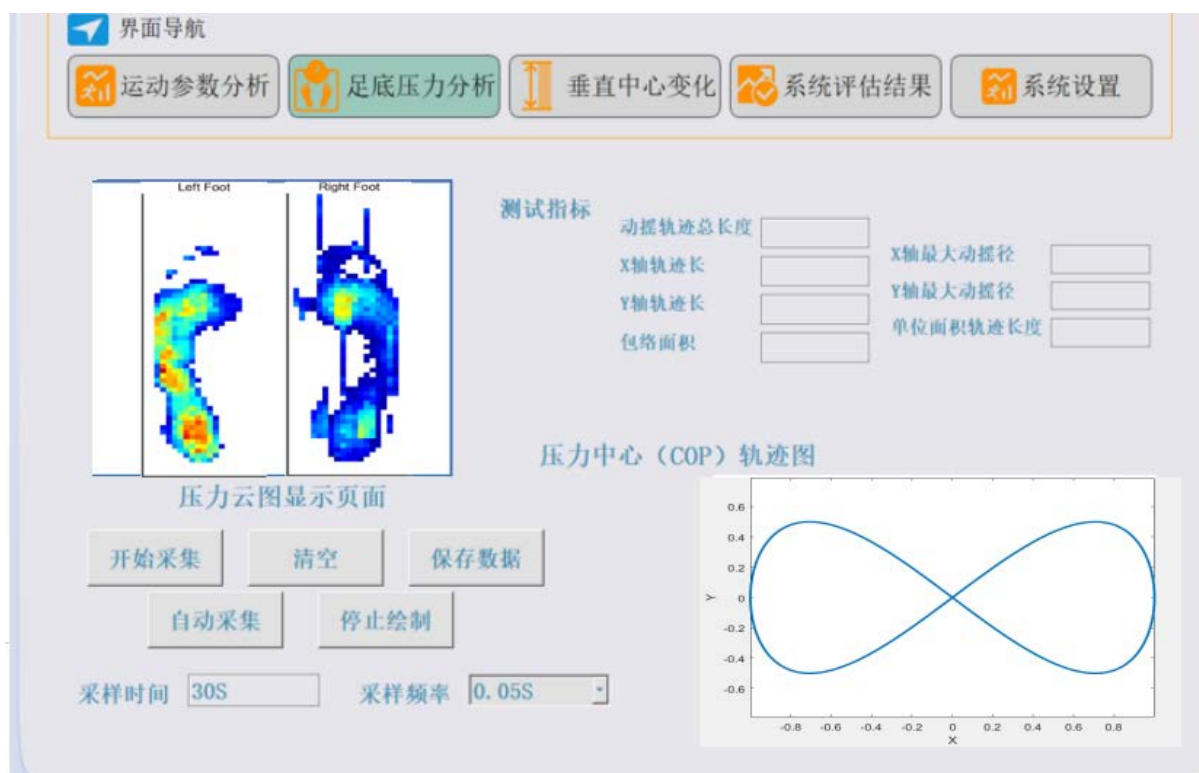


Figure 5. Plantar pressure analysis interface

图 5. 足底压力分析界面

3.3.3. 垂直重心界面

垂直重心界面显示拉绳位移传感器的变化量, 将点击“曲线变化”按钮的信号与绘制曲线的槽函数绑定, 同样使用 `qcustomplot` 模块作为参考坐标系, 为了更清晰地查看绘制的曲线, 加入图形缩放功能,

同时鼠标点击曲线会显示相应的数据，如图 6 所示。

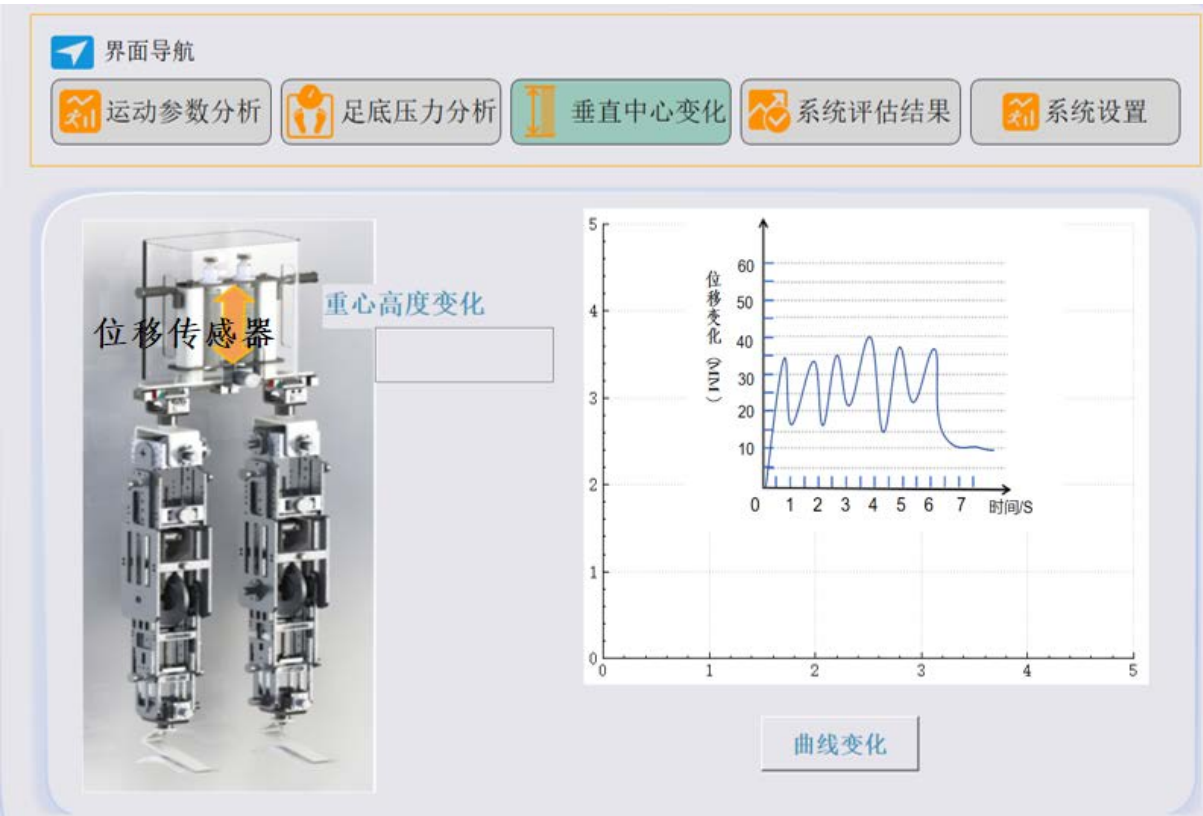


Figure 6. Vertical center of gravity displacement change interface
图 6. 垂直重心位移变化界面

3.4. 安全评估结果

3.4.1. 评价体系构建

在对下肢外骨骼运动过程中的安全性进行评价时，多个因素的选择一定需要是全方面的有效的，并对于各个因素的重要性不同区分不同的权重，还需要考虑到元素之间也会相互影响，经过对于几种不同的评价方法的比较，最终选择模糊网络分析法。经过查阅大量文献及现行规范，对评价指标不断筛选及优化，最终确定为三个一级指标与九个二级指标，如表 3 所示。

Table 3. Lower limb exoskeleton safety analysis indicators
表 3. 下肢外骨骼安全性分析指标

一级指标		二级指标
稳定性 u_1	髋关节角度变化 u_{11} ，膝关节角度变化 u_{12} ，踝关节角度变化 u_{13} ，垂直重心位移变化 u_{14}	
对称性 u_2	足底压力中心(COP)轨迹长度 u_{21} ，COP 轨迹面积 u_{22} ，X、Y 轴轨迹长度 u_{23} ，时相对称性 u_{24}	
助力性 u_3	关节力矩助力程度 u_{31}	

3.4.2. 模糊综合评价法

根据下肢外骨骼安全测试网络结构体系建立因素集即：

一级指标因素集: $U = \{u_1, u_2, u_3\}$;

二级指标因素集: $u_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}\}$, $u_2 = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}\}$, $u_3 = \{u_{31}\}$ 。

根据评价的目标要求需要建立备择集, 备择集是推断可能出现的所有结果所组成的集合, 根据现行规范将评语分成了 4 个等级: $\{V_1 \text{ 特别安全}, V_2 \text{ 较安全}, V_3 \text{ 安全程度有待提高}, V_4 \text{ 不安全}\}$ 。再从二级指标出发分析对每个结果可能产生的影响, 由专家打分的形式得到, 现将统计结果整理如下(如表 4)。

Table 4. The statistical results of the one-factor evaluation of the secondary indicators

表 4. 二级指标单因素评价统计结果

因素	V1	V2	V3	V4
u11	8	1	1	0
u12	4	3	3	0
u13	3	3	3	1
u14	3	2	5	0
u21	6	2	1	1
u22	5	3	2	0
u23	4	4	1	1
u24	4	3	3	0
u31	6	2	1	1

通过单因素的评价, 建立模糊关系矩阵 R , 即 U 从 V 到的一种相对模糊的关系。

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.3 & 0.2 & 0.5 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, r_{ij} 为评价因素 u_i 在评价等级上 V_j 上的隶属度, 即频率发布, 将其归一化处理。

根据评价因素间耦合关系的分析, 建立 ANP 网络层结构。基于影响度比较表(表 5)得到每个准则下的模糊两两判断矩阵, 再使用特征根法计算一个元素对另一个元素的影响程度排序向量, 进而得到未加权的超矩阵。重复以上步骤, 将得到的结果进行组合, 可以得到关于二级指标的模糊超矩阵 W , 再将元素组作为元素构建一级指标模糊权重矩阵。最后对未加权的超矩阵 W 进行加权得到极限超矩阵。最后通过计算极限超矩阵得到各因素权重, 各评价因素权重归一化后并得到因素集的权重向量 $A = (0.174, 0.096, 0.069, 0.116, 0.067, 0.059, 0.044, 0.163, 0.212)^T$ 。可以看出, 对下肢外骨骼安全性影响程度最大的一级因素为稳定性, 其次为助力性, 下肢外骨骼系统复杂且耦合度高, 极易对人体产生较大的伤害, 因此保证下肢外骨骼运动过程中的稳定性是保证安全的关键。

最后运用模糊数学运算方法来最终确定综合评价结果, 将评价矩阵 R 与权重向量 A 进行模糊变换: $B = A * R$, 其中模糊运算算子 $*$ 采用 $M(\cdot, \oplus)$ 算子, 即加权平均法, 该算子的运算规则为 $b_j = \sum a_i \cdot r_{ij}$, 最终得到评价结果 B 。

Table 5. Impact comparison table
表 5. 影响度比较表

重要语言标度	三角模糊标度	三角模糊倒数标度
同等重要	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
稍微重要	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)
强烈重要	(9/2, 5, 11/2)	(1/11, 2/5, 2/9)
非常强烈重要	(13/2, 7, 15/2)	(2/15, 1/7, 2/13)
绝对重要	(17/2, 9, 19/2)	(2/19, 1/9, 2/17)

3.5. 数据存储模块

数据存储模块使用 Qt 原生自带的 SQLite 数据库。当系统连接数据库后，大量的原始数据和数据处理结果会实时存储在数据库中，方便用户查询检测记录进行二次分析。查询历史记录时也能直观地观察历史数据，方便进行进一步分析和观察数据。

在本系统的数据库中需要建立两张数据表，其中一张数据表用于存放下肢外骨骼安全测试平台通信端口等。另一张表用于存放检测数据及检测结果，如运动各角度参数、足底平均压力、垂直重心位移量、检测时间等，对这些数据进行检测，选择适合各项数据的数据类型及数据长度将数据储存起来。

4. 实验验证与分析

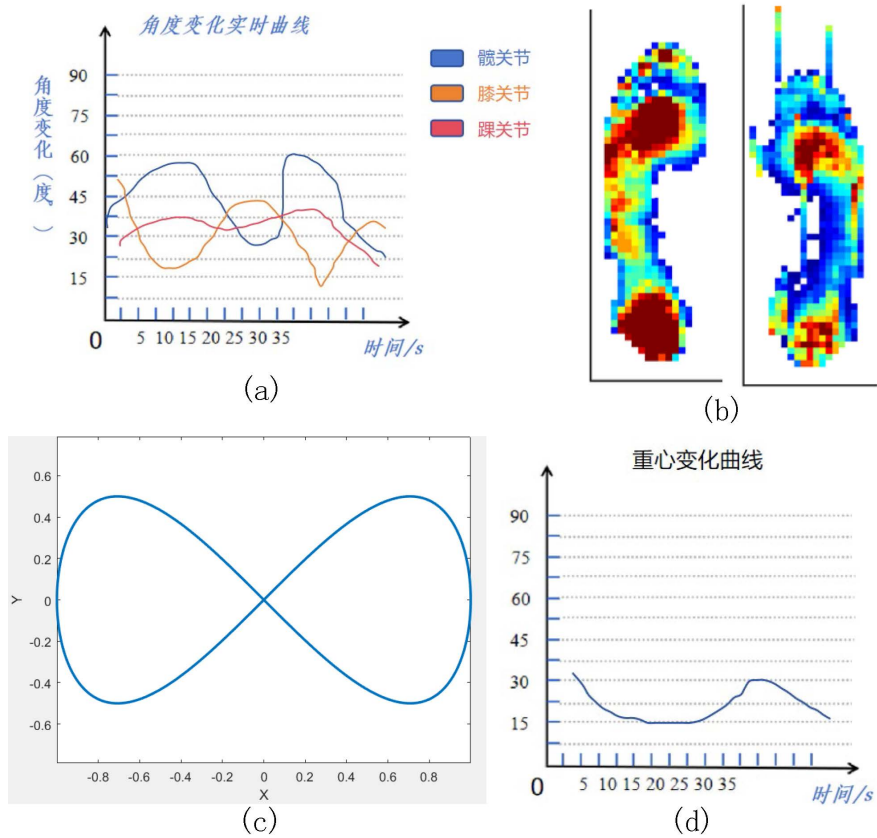


Figure 7. Example of detection results
图 7. 检测结果示例

为了测试上位机软件功能的实现, 基于测试平台进行行走测试实验, 测试平台运动过程中, 通过上位机可视化界面可以看到各功能模块的数据变化, 运动参数以角度变化为例(如图 7(a)), 一个步行周期中各关节的角度变化均呈现一定的规律性; 足底压力的变化主要表现在压力云图(图 7(b))与压力中心(图 7(c))上, 压力云图可以直观的反应行走过程中足底压力大小的变化, 而压力中心轨迹呈“ ∞ ”字符形作为行走过程中稳定性的参考; 垂直重心的变化幅度较小(如图 7(d)), 但也呈现一定的周期性, 可用于表征测试平台行走过程的稳定性。

通过如上数据变化, 说明上位机软件各模块基本功能运转正常。

再对实验过程的数据进行归一化处理, 结合模糊网络分析法(FANP)分析最终的评价结果, 测试平台在此次行走过程中较为安全, 其中稳定性的权重高于助力性, 助力性的权重高于对称性, 需要表明的是, 本研究只是给出了一个综合评价结果, 指标数也较少, 对于外骨骼在实际的运动过程中是否会对人产生风险, 还可以从更多的层面进行考虑。

5. 结论

本文主要介绍了一款用于下肢外骨骼安全测试平台的上位机软件, 其可以接收安全测试平台发送的运动信息数据并可视化显示以及输出安全测试结果等功能。文中详细阐述了所述上位机软件各功能模块的设计和实现原理, 并以下肢外骨骼安全测试平台为实验用例, 实现了其运行时状态数据的可视化, 实验清晰地反映出测试假人运动过程中的数据变化, 验证了该上位机软件所述功能的有效性, 最后在建立评价指标体系的基础上, 综合考虑了评价指标间的内部耦合关系和下肢外骨骼安全评价的模糊性, 运用模糊综合评判和 ANP 相结合的模糊网络分析法, 构建了下肢外骨骼安全评价模型, 在下肢外骨骼运动数据相对缺乏的情况下, 该模型具有一定的优越性和实用性。此外, 该上位机软件所述功能仅以下肢外骨骼安全测试平台实验为例验证了其有效性, 对于涉及其他测试平台的运动控制研究同样有一定的适用性。

基金项目

国家重点研发计划“脑瘫儿童运动功能障碍与姿势异常外骨骼机器人干预技术”(2023YFC3604803)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html, 2023-03-27.
- [2] 丁逸苇, 涂利娟, 刘怡希. 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人研究进展[J]. 机器人, 2022, 44(5): 522-532.
- [3] Pransky, J. (2014) The Pransky Interview: Russ Angold, Co-Founder and President of Ekso™ Labs. *Industrial Robot: An International Journal*, **41**, 329-334. <https://doi.org/10.1108/ir-05-2014-0334>
- [4] Esquenazi, A., Talaty, M., Packel, A. and Saulino, M. (2012) The Rewalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **91**, 911-921. <https://doi.org/10.1097/phm.0b013e318269d9a3>
- [5] Qian, Z. and Bi, Z. (2014) Recent Development of Rehabilitation Robots. *Advances in Mechanical Engineering*, **7**, Article ID: 563062. <https://doi.org/10.1155/2014/563062>
- [6] Chen, F., Yu, Y., Ge, Y.J. and Fang, Y. (2009) WPAL for Human Power Assist during Walking Using Dynamic Equation. 2009 *International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, 9-12 August 2009, 1039-1043. <https://doi.org/10.1109/icma.2009.5246270>
- [7] Sankai, Y. (2010) HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics. In: Kaneko, M. and Nakamura, Y., Eds., *Robotics Research*, Springer Berlin Heidelberg, 25-34. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14743-2_3
- [8] Ha, K.H., Murray, S.A. and Goldfarb, M. (2016) An Approach for the Cooperative Control of FES with a Powered Exoskeleton during Level Walking for Persons with Paraplegia. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **24**, 455-466. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2015.2421052>
- [9] 傅利叶发布全新产品 Fourier X2 以及外骨骼机器人开放平台[EB/OL].

- https://www.sohu.com/a/290815348_179469, 2022-03-14.
- [10] 北京大艾机器人官网[EB/OL]. <https://www.ai-robotics.cn/sys-pd/5.html>, 2022-03-14.
- [11] 康乾. 下肢外骨骼机器人的综合性能评价[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- [12] 薛强, 周金满, 杨硕. 应用于下肢功能障碍者的康复机器人: 综述[J]. 制造业自动化, 2022, 44(7): 50-55.
- [13] Zeilig, G., Weingarden, H., Zwecker, M., Dudkiewicz, I., Bloch, A. and Esquenazi, A. (2012) Safety and Tolerance of the Rewalk™ Exoskeleton Suit for Ambulation by People with Complete Spinal Cord Injury: A Pilot Study. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, **35**, 96-101. <https://doi.org/10.1179/2045772312y.0000000003>
- [14] Torricelli, D., Cortés, C., Lete, N., Bertelsen, Á., Gonzalez-Vargas, J.E., del-Ama, A.J., *et al.* (2018) A Subject-Specific Kinematic Model to Predict Human Motion in Exoskeleton-Assisted Gait. *Frontiers in Neurorobotics*, **12**, Article No. 18. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2018.00018>
- [15] 祝敏航. 基于机器视觉的下肢外骨骼康复运动检测系统[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [16] Zhou, L., Chen, W., Chen, W., Bai, S., Zhang, J. and Wang, J. (2020) Design of a Passive Lower Limb Exoskeleton for Walking Assistance with Gravity Compensation. *Mechanism and Machine Theory*, **150**, Article ID: 103840. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103840>