

上肢康复机器人结构设计和仿真分析

易子渊, 黄鹏鹏, 王慧钰, 杨景

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年5月30日; 录用日期: 2023年7月19日; 发布日期: 2023年7月26日

摘要

针对上肢偏瘫患者进行康复训练的问题, 设计了一款末端牵引式多自由度上肢康复机器人。该康复机器人可实现肩关节水平方向外展/内收、竖直方向上摆/下摆和肘关节水平方向外展/内收运动。首先根据人体解剖学确定人体各关节的运动形式和运动范围, 然后根据关节运动形式和要求进行机械结构设计, 并根据人体尺寸对核心结构进行选型与设计。然后通过ADAMS对模型进行仿真验算, 验证模型的可行性。最后对上肢康复机器人进行运动学分析, 建立起机器人末端坐标系与基坐标系之间的变换矩阵, 并通过MATLAB对结果进行验证。

关键词

康复机器人, 结构设计, Adams仿真, 运动学分析

Structural Design and Simulation Analysis of Upper Limb Rehabilitation Robot

Ziyuan Yi, Pengpeng Huang, Huiyu Wang, Jing Yang

School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: May 30th, 2023; accepted: Jul. 19th, 2023; published: Jul. 26th, 2023

Abstract

In order to assist hemiplegic patients in rehabilitation training, a multi degree of freedom end traction upper limb rehabilitation robot was designed. This rehabilitation robot can achieve shoulder joint horizontal abduction/adduction, vertical upward/downward swing, and elbow joint horizontal abduction/adduction movements. First, determine the motion form and range of each joint

of the human body according to human anatomy, then design the mechanical structure according to the motion form and requirements of the joint, and select and design the core structure according to the size of the human body. Then, simulate and verify the feasibility of the model through ADAMS. Finally, the kinematics of the upper limb rehabilitation robot is analyzed, the transformation matrix between the end coordinate system and the base coordinate system of the robot is established, and the results are verified by MATLAB.

Keywords

Rehabilitation Robot, Structural Design, Adams Simulation, Kinematics Analysis

Copyright © 2023 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

随着中国老龄化问题的加剧,老年人中风的人数逐渐增加,目前在临床康复领域,中风的康复方式为医师或护工以“手把手”这种原始方式完成。但是人工康复训练局限性很大,一方面为了确保训练效果,避免对患者造成二次伤害,需要康复训练师进行针对性训练,对训练师的专业性提出了比较高的要求。另一方面,人工康复患者参与度较低,康复效率低,且会给患者家庭带来沉重的经济负担。医疗机器人的应用很好地改善了这一状况[1],相比于传统医疗康复效果而言,下肢康复下肢机器人运用了更多领域内的专业知识,能够科学指导患者进行康复训练[2][3]。

下肢康复训练机器人作为患者康复的重要手段,其训练动作对患者步态的模拟存在难点问题[4]。刘玉博等设计了一款六自由度的左右手通用的上肢康复机械手,能够满足人体上肢的所有运动,并搭建了实际的样机[5]。郭建等设计一款可穿戴式的上肢康复机器人,针对其机构的运动学正解和逆解进行了推导及验证,并基于五次多项式对其运动轨迹进行了规划[6]。廖斌等基于三自由度的冗余绳牵引并联机构设计了一款面向上肢康复的机器人,并进行了运动学的建模分析[7]。王占礼等设计了一种肩关节全驱动式5自由度上肢外骨骼康复机器人,构建了机构的运动学和动力学模型,并进行了仿真分析[8]。蔡国庆等设计了一种6自由度上肢康复训练机器人,实现了肩关节、肘关节和腕关节复合康复运动训练。对该机器人进行了运动学建模和仿真分析[9]。

本文基于手臂术后的康复过程,设计了一款平面操作型上肢康复机器人,用于辅助患者进行康复训练。针对其结构进行了设计建模,搭建了机构的运动学模型,并利用 Matlab 和 Adams 软件进行了仿真验证。

2. 康复机器人结构设计

2.1. 人体上肢运动分析

人体单臂由 32 块骨骼和 34 块肌群以及与骨骼相连的肌腱组成。图 1 为人体上肢骨骼解剖图,从中可得人体上肢主要由肩关节、肘关节、腕关节三部分组成,其中肩关节和肘关节通过肱骨连接,肘关节和腕关节通过桡骨、尺骨连接。各个关节之间主要通过平移和旋转的方式完成各种复杂运动。

根据中立位零度法,确定各关节的活动范围如下图 2 所示。

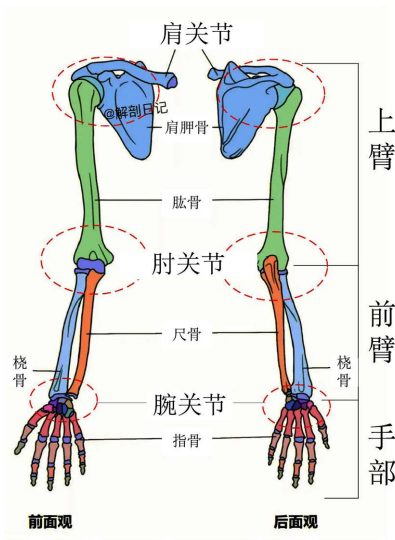


Figure 1. Diagram of the structure of the human upper limb

图 1. 人体上肢结构

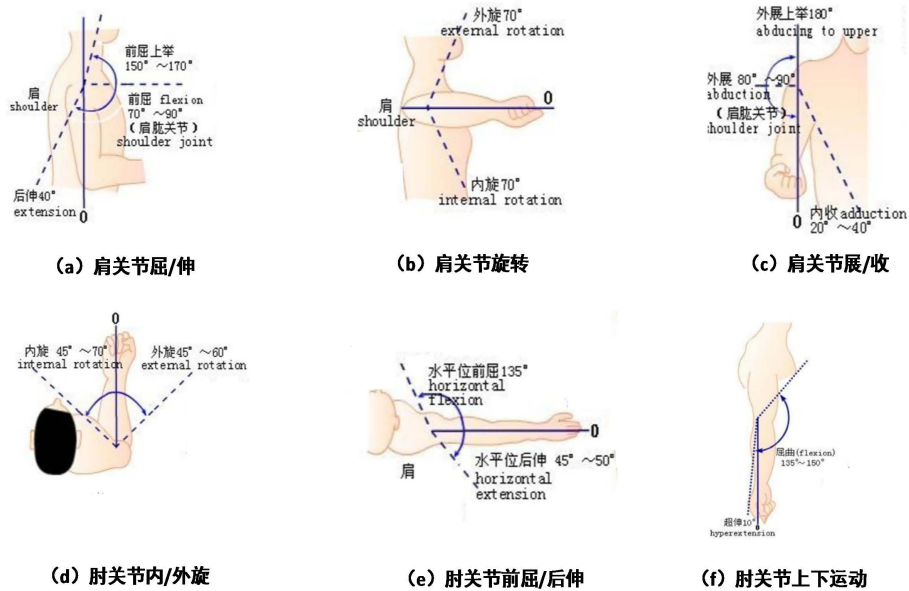


Figure 2. The movement of the upper limbs of the human body

图 2. 人体上肢运动

Table 1. Range of motion of the joints of the upper limbs of the human body

表 1. 人体上肢各关节运动范围

关节	主要运动形式	运动范围	最大运动范围
肩关节	前屈后伸	-30°~90°	-45°~180°
	外展内收	-20°~90°	-45°~180°
肘关节	内旋外旋	-35°~45°	-45°~60°

2.2. 上肢康复机器人机械结构设计

根据表 1 中人体各关节运动范围, 设计一款三自由度上肢康复机器人, 用于患者上肢康复训练。上肢康复机器人整体三维模型如图 3 所示。

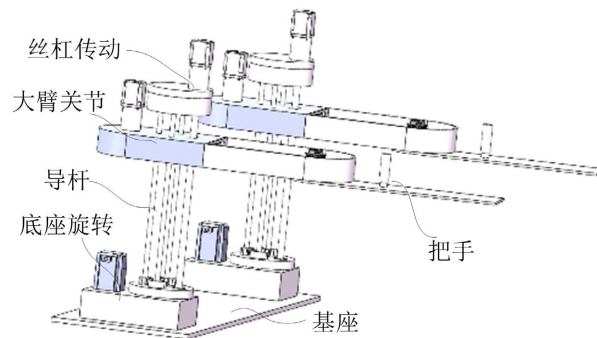


Figure 3. Holistic model of upper limb rehabilitation robot
图 3. 上肢康复机器人整体模型

该模型主要由升降平台、大臂关节、小臂关节、基座四部分组成, 其中安装在基座上的电机通过带轮组带动大臂转动, 从而实现患者肩关节外展内收运动康复训练; Z 轴方向电机与滚珠丝杠连接, 电机驱动滚珠丝杠运动, 从而带动升降平台运动, 以适应不同患者身高需求, 同时带动患者肩关节实现前屈后伸康复运动; 安装在升降平台上的电机驱动带轮组运动, 从而带动小臂转动, 继而实现患者肘关节的内旋外旋康复训练。

3. 基上肢康复机器人运动学分析

根据上肢康复机器人传动过程, 可将机器人简化为一个 RPR 模型。根据经典 D-H 建模法要求, D-H 模型如下图 4 所示, D-H 参数如表 2 所示。

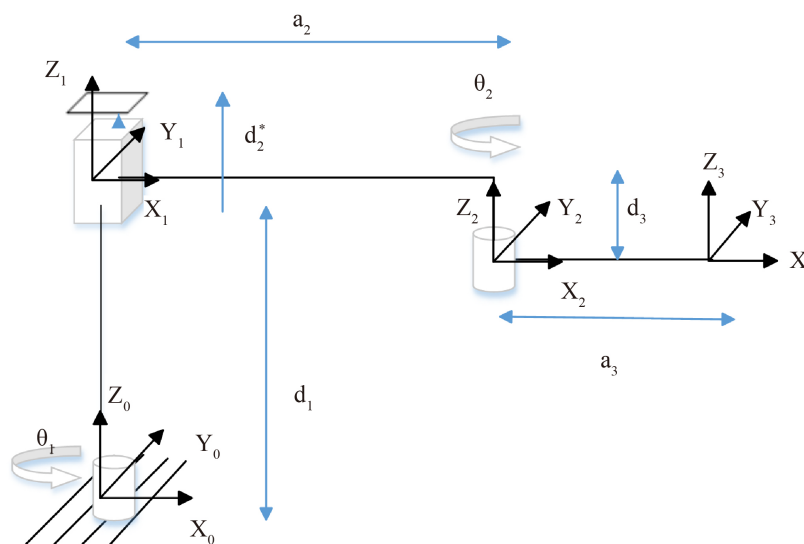


Figure 4. Kinematics coordinate system of rehabilitation robot
图 4. 康复机器人运动学坐标系

Table 2. D-H parameter table of upper limb rehabilitation robot
表 2. 上肢康复机器人 D-H 参数表

连杆 i	α_i	a_i	θ_i	d_i
1	0	0	θ_1^*	d_1
2	0	a_2	0	d_2^*
3	0	a_3	θ_2^*	$-d_3$

基于已知的 D-H 参数和相邻连杆间变换矩阵通式，可以解出上肢康复机器人末端在基坐标系下的变换矩阵。

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i c\alpha_i & -c\theta_i s\alpha_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_3 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_3 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^0T_3 = {}^0T_1(d_1) {}^1T_2(\theta_1) {}^2T_3(\theta_2) \quad (3)$$

由机器人正运动学可知，当机器人各关节变量值确定时，可以求出机器人末端相对于基坐标系的变换矩阵。利用 Matlab 软件搭建机器人机构模型来模拟机构真实的输出，如图 5 所示。通过给定各关节变量特定值，分别用理论计算法和 MATLAB 仿真法求取末端变换矩阵，并将两者进行比较，从而验证机器人正运动学的正确性。

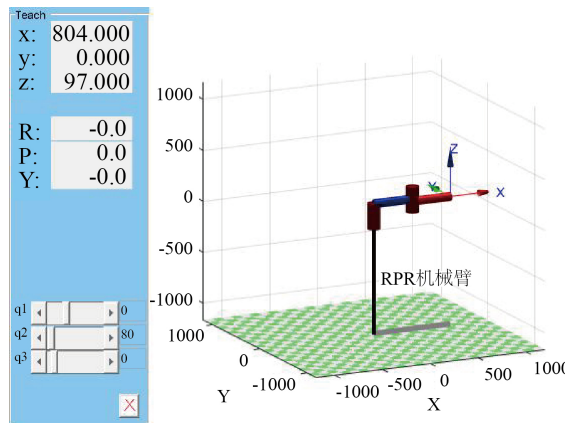


Figure 5. Matlab simulation model of rehabilitation robot
图 5. 康复机器人 Matlab 仿真模型

4. 基于 Adams 的康复机器人仿真分析

4.1. 基于 Adams 的机器人关节运动仿真

为了验证康复机器人模型的可行性，本节首先将 solidworks 模型导入 ADAMS 仿真软件中，并对机

器人康复训练运动进行运动学分析，以验证其可行性。在搭建的虚拟样机模型如图 6 所示，虚拟样机模型中，臂杆物理参数来源于三维模型属性。通过添加关节约束和驱动实现训练过程的模拟，并以平面二连杆来模拟人体上肢，在关节处添加扭簧来模拟人体手臂不同的运动程度。

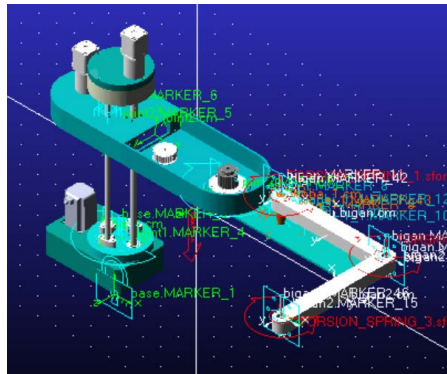


Figure 6. Rehabilitation robot virtual prototype simulation model

图 6. 康复机器人虚拟样机仿真模型

在定义好模型相关属性后，便可对模型进行运动学仿真处理。在仿真开始前，需要定义仿真时间和仿真步数。本文仿真设置仿真时间为 30 s，仿真步数为 300 步。根据关节运动情况不同，可将关节运动分为单关节运动和复合关节运动两部分，下面将根据关节不同运动形式分别进行运动学仿真。

肩关节外展内收运动：

肩关节外展内收运动运动形式为：当其他关节静止时，肩关节从初始位置匀速运动到与初始位置夹角为 -40° ，随后匀速运动到与初始位置夹角为 90° ，最后回到初始位置。

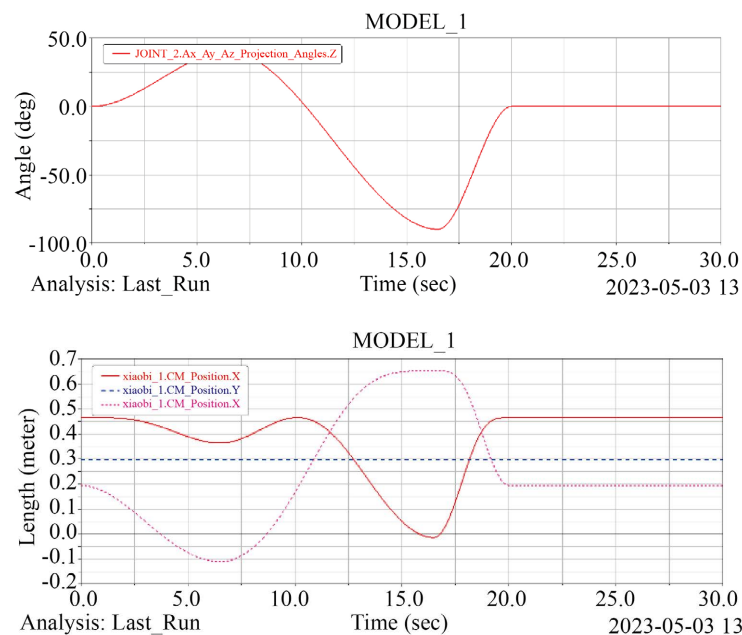


Figure 7. Shoulder joint abduction adduction motion Angle and terminal displacement curve

图 7. 肩关节外展内收运动角度和末端位移曲线

图 7(a)体现了肩关节外展内收运动时, 关节角度变化情况。在 0 s~6.5 s, 肩关节做内收运动至 40° ; 在 6.5~16.5 s, 肩关节做外展运动至 -90° ; 在 16.5~20 s, 肩关节返回初始位置。肩关节外展内收的运动范围为内收 40° 到外展 90° 。

图 7(b)体现了肩关节外展内收运动时, 机器人末端位移在三个坐标分量上的变化情况。其中红色实线显示 x 方向上的位移变化; 蓝色虚线显示 y 方向上的位移变化; 粉色虚线显示 z 方向上的位移变化。由图可知, 在肩关节做内收运动时, 末端位移在 x 方向上的分量呈现周期性变化趋势, 在 z 方向上分量逐渐变小; 肩关节做外展运动时, 末端位移在 x 方向上的分量先减小后增大, 最后回归初始位置, 在 z 方向上分量先增大后减小, 最后回归初始位置; 末端位移在 y 轴上的分量一直为 0, 说明机器人末端一直运动在 XOZ 平面内。

肩关节上抬下压运动运动形式为: 当其他关节静止时, 升降平台从初始位置匀速运动到与初始位置距离为 140 mm 处, 随后匀速运动回到初始位置。

图 8(a)体现了肩关节上抬下压运动时, 关节位移变化情况, 图 8(b)体现了肩关节上抬下压运动时, 机器人末端位移在三个坐标分量上的变化情况。由图可知, 在肩关节上抬下压运动时, 机器人末端在 y 方向上和大臂保持相对静止一起移动, 在 x、z 方向上无运动分量。

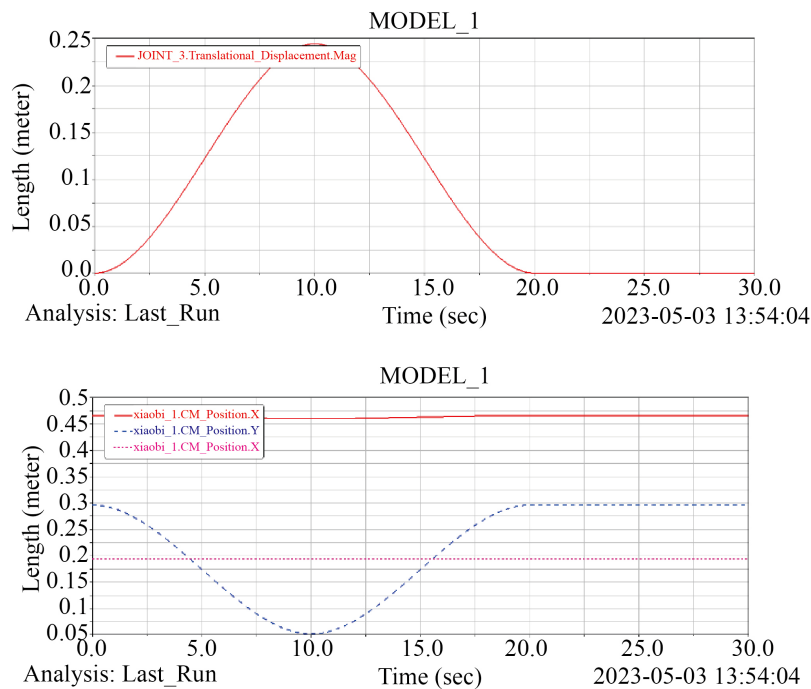


Figure 8. Joint lifting and pressing motion Angle and terminal displacement curve
图 8. 肩关节上抬下压运动角度和末端位移曲线

本文中所涉及的三关节复合运动是指肩关节外展内收、肩关节上抬下压运动和肘关节外展内收运动的三自由度复合运动。

由图 9 可知, 在 0~10 s 时, 末端位移在 x 方向上先减小后增加, 在 y 方向上分量逐渐变小, 在 z 方向上位移先减小后增大; 在 10~20 s 时, 末端位移在 x 方向上位移先减小后增大最后回到初始位置, 在 y 方向上分量逐渐增大至初始位置, 在 z 方向上分量先增大后减小至初始位置。

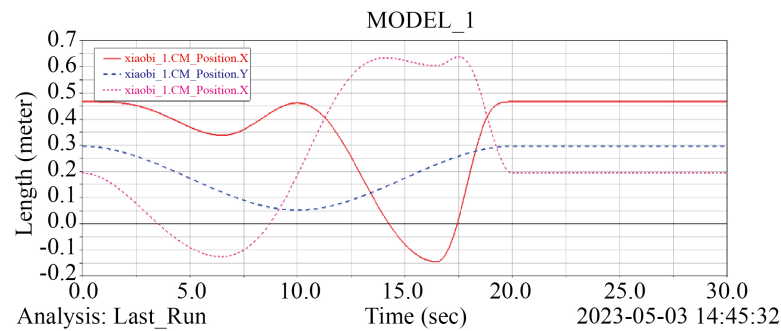
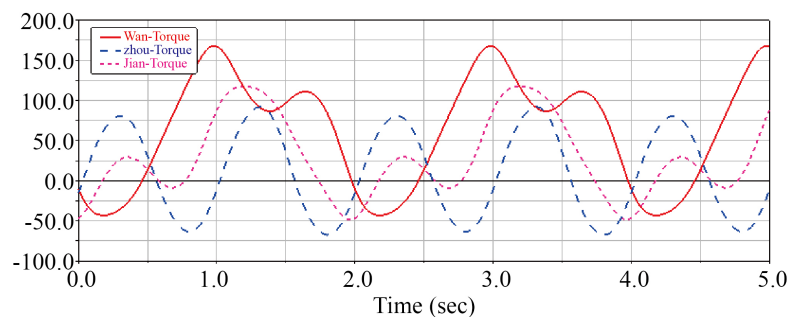


Figure 9. Terminal displacement curve of three joint complex motion
图 9. 三关节复合运动末端位移曲线

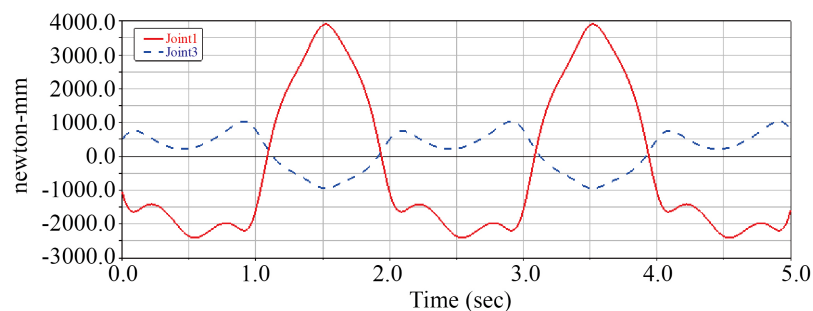
4.2. 基于 Adams 的机器人关节动力学仿真

在搭建的虚拟样机模型基础上，通过设置关节扭簧处的刚度系数和阻尼系数来模拟人体手臂不同的训练强度。第一组刚度系数为 $1 \text{ N}\cdot\text{mm}/^\circ$ ，第二组刚度系数为 $10 \text{ N}\cdot\text{mm}/^\circ$ 。第一组阻尼系数为 $1 \text{ N}\cdot\text{mm}\cdot\text{s}/^\circ$ ，第二组阻尼系数为 $10 \text{ N}\cdot\text{mm}\cdot\text{s}/^\circ$ 。第一组为模拟人体手臂运动能力丧失较多，第二组则是运动能力缺失不多的情况。

第一组刚度、阻尼系数条件下，设置仿真时间为 5 s，得到手臂关节扭矩与机器人关节驱动力矩，如图 10 所示。结果显示，手臂关节手腕部扭矩最大，变化范围为 $-50 \text{ N}\cdot\text{mm}\sim 175 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ，肘关节扭矩变化范围为 $-75 \text{ N}\cdot\text{mm}\sim 100 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ，肩关节扭矩变化范围为 $-50 \text{ N}\cdot\text{mm}\sim 125 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。此时对应的机器人旋转关节驱动力矩变化结果为关节 1 驱动力矩变化为 $-2.5 \text{ N}\cdot\text{m}\sim 4 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，关节 2 驱动力矩变化为 $-1 \text{ N}\cdot\text{m}\sim 1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。



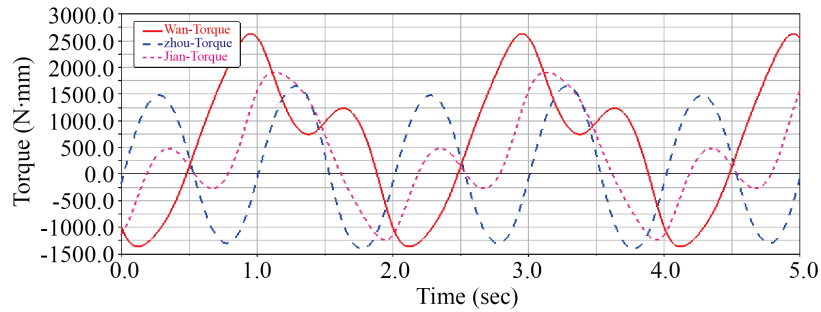
(a) 人手臂腕、肘、肩关节扭矩



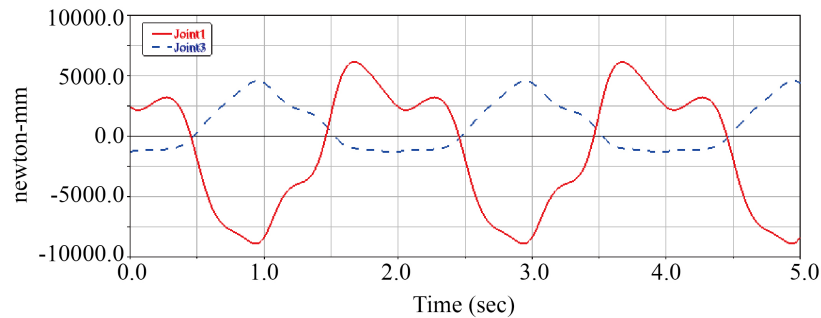
(b) 康复机器人关节转矩

Figure 10. The first set of stiffness and damping coefficients under the simulation results
图 10. 第一组刚度和阻尼系数下的仿真结果

第二组刚度阻尼系数比第一组增大十倍的情况，结果如图 11 所示。手臂关节手腕部扭矩最大，变化范围为-1.5 N·m~2.5 N·m，肘关节扭矩变化范围为-1.5 N·m~1.75 N·m，肩关节扭矩变化范围为-1.25 N·m~2 N·m。此时对应的机器人旋转关节驱动力矩变化结果为关节 1 驱动力矩变化为-8 N·m~7 N·m，关节 2 驱动力矩变化为-2.5 N·m~5 N·m。可见，手臂的刚度和阻尼系数对机器人关节的驱动力矩有明显的影响。



(a) 人手臂腕、肘、肩关节扭矩



(b) 康复机器人关节转矩

Figure 11. The second set of stiffness and damping coefficients under the simulation results

图 11. 第二组刚度和阻尼系数下的仿真结果

5. 控制系统搭建

上肢康复机器人控制系统硬件搭建关系如图 12 所示。在进行机器人实验测试之前，需要进行电机输出测试，以验证控制系统的可行性以及电机输出是否正常。

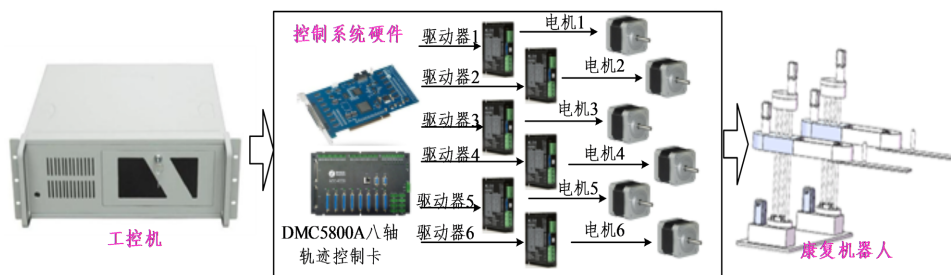


Figure 12. Control system hardware building diagram

图 12. 控制系统硬件搭建关系图

电机输出测试主要用于测试电机输出转速及转向，通过单轴测试模块设置每个电机的输出转速和转

向。实验结果表明，机器人控制系统能够实时控制电机输出，在运行过程中，随时可以通过紧急停止按钮实现电机急停操作。

搭建的单臂康复机器人实验测试实物如下图 13 所示，机器人实验测试主要是对机器人运行轨迹进行测试，首先将康复机器人目标轨迹点位信息导入多轴测试模块中，并设置单轴运转速度和方向，然后测试机器人在不同轨迹下的运行情况，实验表明，康复机器人能够实现多种康复训练轨迹。

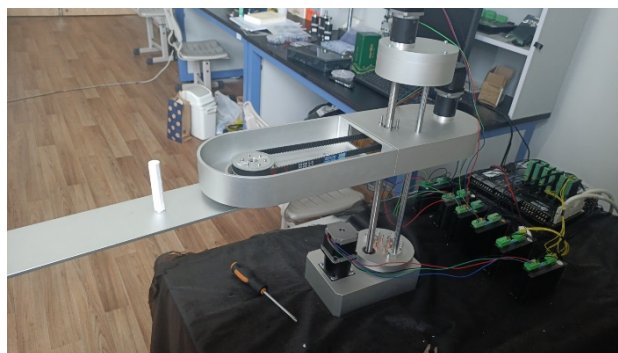


Figure 13. The prototype of a one-arm rehabilitation robot was built

图 13. 搭建的单臂康复机器人样机

6. 结论

本文根据人体解剖学相关内容，提出了一种多自由度上肢康复机器人。并对机器人每个关节的传动方案进行相应设计，然后运用 ADAMS 虚拟样机软件对肩关节外展内收运动、肩关节上抬下压运动、肘关节外展内收运动、摆臂屈肘运动、抬臂屈肘运动和三关节复合运动进行运动学仿真，并对运动结果进行分析，结果显示康复机器人运动过程过渡平稳，能满足康复训练的要求，不会对患肢造成二次伤害；随后根据三维模型对机器人进行运动学建模，通过 DH 建模法确定各连杆的 DH 参数，从而求出机器人末端坐标系与基坐标系之间的齐次变换矩阵，通过逆运动学解出末端坐标系做基坐标系中的逆解，并通过 MATLAB 验证正逆运动学的正确性。搭建了实际的单臂康复机器人实验样机，并建立了控制系统，进行了康复训练模拟。为后续控制研究打下基础。

基金项目

浙江省自然科学基金(LQ21F020026)，浙江理工基本科研业务费项目(22242296-Y)。

参考文献

- [1] 倪自强, 王田苗, 刘达. 医疗机器人技术发展综述[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 45-52.
- [2] 苏鹏, 李冬静, 程露露, 曾斯琴, 胡婷, 杨德才, 陈瑞全, 孟思进. 上肢康复机器人对脑卒中后肩痛患者的疗效观察[J]. 神经损伤与功能重建, 2023, 18(3): 181-183.
- [3] 张丽英, 王杰宁, 于小明. 机器人辅助训练对脑卒中患者上肢运动功能效果的 Meta 分析[J]. 中国康复理论与实践, 2023, 29(2): 156-166.
- [4] 王壮, 王轶钊, 丘世因, 等. 脑卒中上肢康复机器人研究进展[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2023, 23(1): 15-21.
- [5] 刘玉博, 王经坤, 陈蕾, 林明星. 两肢通用型上肢康复机器人系统设计与研究[J/OL]. 机械设计与制造: 1-5. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20230512.006>, 2023-05-15.
- [6] 郭建, 廖泰明, 郑兴强. 可穿戴式上肢康复机器人运动学计算和仿真[J]. 机床与液压, 2023, 51(3): 78-84.

- [7] 廖斌, 陆佳琪, 李煜, 李国翠. 基于绳牵引并联机构的上肢康复机器人设计[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14229-14236.
- [8] 王占礼, 段志峰, 李爽, 高墨尧, 庞在祥. 肩关节全驱动上肢康复机器人的设计与分析[J]. 机械传动, 2022, 46(10): 42-48.
- [9] 蔡国庆, 李杰, 石岩, 周利杰. 上肢偏瘫康复机器人结构设计与仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2022(5): 62-63+66.