

DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2304-5042-0968

上肢外骨骼机器人结构设计与运动学分析

杨述

(长沙民政职业技术学院 湖南长沙 410004)



摘要: 上肢外骨骼机器人是近些年新兴的研究领域,国内在这方面的研究尚属于起步阶段,而上肢外骨骼机器人中能够有效满足上肢运动辅助需求的机器人较少,且对安全性考虑较少。针对此现状,深入探讨了运动辅助对于上肢运动功能恢复的理论依据,并依此总结设计了满足该功能的上肢外骨骼机器人的要求,然后依据该要求,以安全性为基本出发点,初步设计了一种外骨骼上肢康复机器人。针对设计出的上肢外骨骼机器人机构,采用四参数法对其进行运动分析,求出了该机器人的正、逆解,并运用拉格朗日方程法对其进行动力学分析,建立其动力学方程,为之后的控制算法研究做好准备。

关键词: 外骨骼 运动辅助 机器人 运动学分析

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1672-3791(2023)21-0005-04

Structural Design and Kinematic Analysis of Upper Limb Exoskeleton Robots

YANG Shu

(Changsha Socail Work College, Changsha, Hunan Province, 410004 China)

Abstract: The upper limb exoskeleton robot is an emerging research field in recent years, and domestic research in this area is still in its infancy. There are few robots in upper limb exoskeleton robots that can effectively meet the needs of upper limb movement assistance, and there are few safety considerations. In response to this situation, this article deeply discusses the theoretical basis of movement assistance for the recovery of upper limb motor function, summarizes the requirements for designing upper limb exoskeleton robots that meet this function, and then preliminarily designs an upper limb exoskeleton rehabilitation robot with safety as the basic starting point based on these requirements. For the designed mechanism of the upper limb exoskeleton robot, the four-parameter method is used for motion analysis, the forward and inverse solutions of the robot are obtained, and then the Lagrange equation method is used for dynamic analysis to establish its dynamic equation, which prepares for the subsequent research on control algorithms.

Key Words: Exoskeleton; Movement assistance; Robot; Kinematic analysis

1 上肢运动辅助理论

运动辅助是一种常见的康复治疗手段,对于上肢运动功能障碍的人具有显著的辅助作用。运动辅助可以帮助上肢运动功能障碍的人恢复上肢肌肉力量和运动,从而提高日常生活自理能力。此外,运动辅助还可以促进神经功能的恢复和再生。近年来,越来越多的研究表明:通过运动辅助进行康复训练可以显著改善

上肢运动功能障碍人的生活质量和运动功能,因此关于辅助上肢进行康复运动的机器人设备的研究日渐增多^[1-5]。

2 确定自由度

一般人的上肢手臂都具有7个自由度:肩关节的3个自由度、肘关节的两个自由度和腕关节的两个自由度。从理论上来说,为了保证运动的灵活性与上肢机

基金项目: 2021年度湖南省教育厅科学研究项目(项目编号:21C1601)。

作者简介: 杨述(1988—),男,硕士,讲师,研究方向为工业机器人应用技术。

器人能在允许范围内完成各种运动,设计的上肢康复机器人也应该具备7个自由度。但是,整个上臂的几个自由度特别是肩膀处的3个自由度之间的距离很近,也就是空间有限。在有限的空间内实现越多的自由度,意味着结构的设计难度和成本会越高;而且,自由度过于紧凑还会限制整个机器人的可运动空间。综合考虑各因素,拟定上肢康复机器人为5个自由度,每个自由度的安全运动角如表1所示。

表1 上肢康复机器人自由度分布及安全运动角度

部位	自由度	安全运动范围/°
肩关节	前/后伸展	90/45
	内收/外摆	0/90
肘关节	屈/伸	100/0
腕关节	弯曲	15/15
整个手臂	旋转	45/45

3 结构总体设计

结合康复医学及上面分析确定的自由度,以上肢康复运动功能为目标,以安全性为出发点,设计外骨骼上肢康复机器人如图1所示。由图可见,该康复机器人采用外骨骼可穿戴式结构,一共包含了5个自由度,满足之前确定的自由度要求。由于是外骨骼式的设计,上臂和前臂部分都采用轻重量的扁平杆件,同时设计成一定的弧度,并添加软质材料的护环,以包裹使用者的上肢。



图1 上肢康复机器人整体设计图

根据人机工程中规定的成年人上肢手臂长度,初步设定上肢康复机器人的整体尺寸如表2所示,其中肩宽为肩关节内外收摆关节到肩关节前后摆动关节的

表2 上肢康复机器人结构尺寸 (单位:mm)

肩宽	肩高	上臂长度	前臂长度
100	100	300	230

水平距离,肩高为肩关节内外收摆关节到肩关节前后摆动关节的垂直距离,前臂包括腕关节部分。

4 运动学分析

研究任何机器人一般都需要对其进行运动分析^[6-7]。运动学分析是指研究物体在运动中的位置、速度、加速度等参数随时间的变化规律的一种分析方法,在机器人、运动员、车辆等领域中广泛应用。通过运动学分析,可以了解物体的运动轨迹、速度、加速度等物理量的变化规律,为后续的动力学分析和运动控制提供依据。

运动学分析一般采用解析法、几何法、向量法等不同的分析方法。其中,解析法是最为常见的一种方法,通过利用物理学知识建立数学模型,对各种运动参数进行计算。几何法则是基于几何图形的形态和空间关系,利用投影、相似、三角函数等方法计算各项参数。而向量法是以向量及其运算作为基本工具,通过向量叉积、点积等方法进行分析。

4.1 正运动学分析

四参数法已经成为对机器人进行标识和建模的标准方法,其基本思想为:为每个关节指定一个本地参考坐标系,然后确定从一个关节至下一关节的变换,最后将这些所有的变换结合起来,构成机器人的总变换。

依据上述思想首先对上肢康复机器人做适当简化,具体如图2所示。

然后采用该方法对上肢康复机器人进行标识,建



图2 上肢康复机器人结构简化图

立其四参数法坐标系并确定相关参数。建立四参数法坐标系时,使康复机器人的姿态如图2所示。将手臂旋转关节的坐标系建在其延长线与肘关节的旋转轴的交点处。根据图2建立外骨骼式上肢康复机器人的四参数坐标系如图3所示。

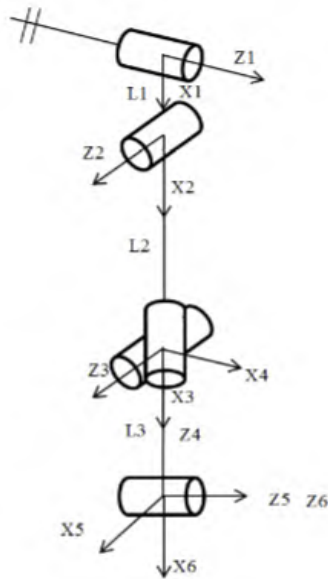


图3 上肢康复机器人四参数法坐标系

得到相应的参数如表3所示。

为了简化表达式,可以令 $C_1 = \cos \theta_1$, $S_1 = \sin \theta_1$ 。根据上述参数,可以得到每两个相邻关节之间的变换矩阵。

关节1与关节2的变换矩阵为

$$A_1 = Rot(z, \theta_1) \times Tran(L_1, 0, 0) \times Rot(x, 90) \\ = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & L_1 C_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 & L_1 S_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

关节2与关节3的变换矩阵为

$$A_2 = Rot(z, \theta_2) \times Tran(L_2, 0, 0) = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & L_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

关节3与关节4的变换矩阵为

$$A_3 = Rot(z, \theta_3) \times Rot(x, 90) = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

关节4与关节5的变换矩阵为

$$A_4 = Rot(z, \theta_4) \times Tran(L_3, 0, 0) \times Rot(x, 90) \\ = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

最后一个变换矩阵为

$$A_5 = Rot(z, \theta_5) = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此总的变换矩阵为

$${}^R T_H = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} n_x &= c_5 [s_1 s_4 - c_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)] \\ &\quad + s_5 (c_1 c_2 c_3 + c_1 c_3 s_2) \\ n_y &= s_5 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2) \\ &\quad - c_5 [c_1 s_4 + c_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)] \\ n_z &= s_{23} c_4 c_5 - c_{23} s_5 \\ o_x &= c_5 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2) \\ &\quad - s_5 [s_1 s_4 - c_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)] \\ o_y &= s_5 [c_1 s_4 + c_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)] \\ &\quad + c_5 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2) \\ o_z &= -c_{23} c_5 - s_{23} c_4 s_5 \\ a_x &= -c_4 s_1 - s_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3) \\ a_y &= c_1 c_4 - s_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1) \\ a_z &= s_{23} s_4 \\ p_x &= c_1 (L_1 + L_3 s_{23} + L_2 c_2) \\ p_y &= s_1 (L_1 + L_3 s_{23} + L_2 c_2) \\ p_z &= L_2 s_2 - L_3 c_{23} \end{aligned}$$

对于正运动学解中代表位置的向量进行分析。设置好各关节的运动角度范围,以及 $L_1 = 100 \text{ mm}$, $L_2 = 300 \text{ mm}$ 和 $L_3 = 230 \text{ mm}$ 等参数,将数据导入 MATLAB

表3 上肢康复机器人四参数法参数表

关节序号	关节扭角 $\theta/^\circ$	关节距离 d/mm	杆件长度 a/mm	杆件扭角 $\alpha/^\circ$
1	θ_1	0	$L_1=100$	90
2	θ_2	0	$L_2=200$	0
3	θ_3	0	0	90
4	θ_4	$L_3=200$	0	90
5	θ_5	0	0	0

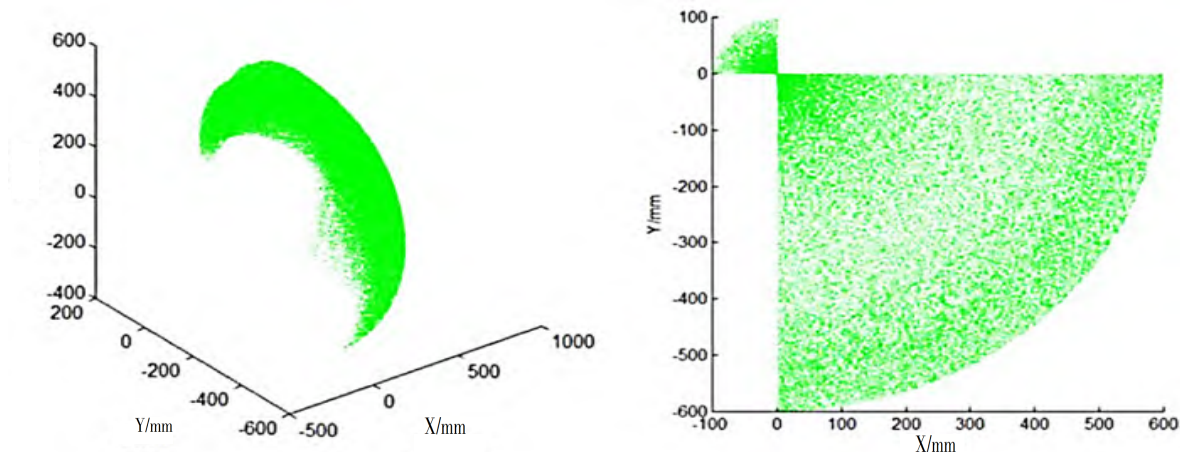


图4 上肢康复机器人运动空间

软件中,编写程序,绘制出上肢康复机器人腕部的运动范围,如图4所示。

4.2 逆运动学分析

对上肢康复机器人进行运动学逆解,即求各关节转角,先将上肢康复机器人的运动方程写为

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 \quad (7)$$

求各个关节的转角可以将式(7)分别左乘相对的逆矩阵,最终求出关节变量,详细步骤如下。

用式(1)的逆乘以式(7)得

$$\begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & L_1 C_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 & L_1 S_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_2 A_3 A_4 A_5 \quad (8)$$

令上式两边(2,4)对应元素相等,可得到:

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = 0 \quad (9)$$

因此,可以求出:

$$\theta_1 = \arctan(p_y/p_x) \quad (10)$$

同理,可求得其他关节角度如下:

$$\theta_2 = \arctan \frac{c_1 p_y - s_2 p_y}{s_1 c_2 p_x + c_1 s_2 p_y + c_2 p_z} \quad (11)$$

$$\theta_3 = \arccos(s_2 + c_2) - \theta_2 \quad (12)$$

$$\theta_4 = \arctan \frac{s_1 a_y + c_1 a_y}{-c_1 c_{23} a_x - s_1 c_{23} a_y + s_{23} a_z} \quad (13)$$

$$\theta_5 = \arctan \frac{a_x s_1 c_{23} - a_y c_1 c_{23} + a_2 s_{23}}{-a_x s_1 s_{23} s_4 + a_x c_1 c_4 + a_y s_1 s_4 + a_z c_{23} s_4} \quad (14)$$

5 结语

本文基于运动辅助理论设计了一种上肢外骨骼机

器人本体结构。整个设计从安全性出发,充分考虑到每个关节允许的运动角度,从结构上为上肢外骨骼机器人的安全性做出了保障。对其进行了正向运动学分析,采用四参数法建立起其坐标系,并推导出了其正向运动学变换矩阵,在这个基础上采用MATLAB编程绘制出了上肢外骨骼机器人腕部的工作轨迹空间,再求出该上肢外骨骼机器人的运动学逆解,为后续的动力学分析和控制研究做好了准备。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王燕. 上肢康复机器人辅助训练对脑卒中偏瘫患者上肢运动功能的影响[J]. 现代养,2022,22(14):1177-1179.
- [3] 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.
- [4] 白敬. 上肢康复机器人关键技术及康复评定的研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [5] 王晓怡. 机器人辅助脑卒中患者上肢康复训练中代偿运动模式分析及识别方法[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [6] WEN Z X, LIU F F, DOU X F, et al. Research on Kinematics Analysis and Trajectory Planning of UR5 Robot [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 11(20): 9438.
- [7] ZHAO J, WU C C, YANG G L, et al. Kinematics Analysis and Workspace Optimization for a 4-DOF 3T1R Parallel Manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167:1-15.