

7自由度外骨骼上肢康复机器人的肩部优化及运动仿真

刘佳俊^{1,2} 张欣波^{1,3} 谢银辉² 李俊² 林桂娟¹ 弓清忠⁴

(1 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

(2 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362200)

(3 龙岩市厦龙工程技术研究院, 福建 龙岩 364000)

(4 集美大学 机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 针对上肢手臂运动障碍康复训练的需求,设计了一种7自由度外骨骼上肢康复机器人。采用扁平电动机及谐波减速器驱动;优化了肩部结构,与传统结构相比,减少了肩部连杆机构45.97%的运动空间占比,提升了肩部结构刚度;通过D-H参数法对机器人正、逆运动学求解并验证;使用蒙特卡洛法分析机器人的工作空间,证明了结构设计的合理性;使用Matlab软件对机器人末端进行了运动轨迹仿真。结果显示,在机器人运动过程中,各个关节的角位移、角速度及角加速度变化连续且平缓,验证了机器人设计的合理性和有效性,满足人体手臂康复训练要求。

关键词 上肢康复机器人 结构优化 运动学 工作空间 轨迹仿真

Shoulder Optimization and Motion Simulation of a 7-DOF Exoskeleton Upper Limb Rehabilitation Robot

Liu Jiajun^{1,2} Zhang Xinbo^{1,3} Xie Yinwei² Li Jun² Lin Guijuan¹ Gong Qingzhong⁴

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

(2 Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362200, China)

(3 Longyan Xialong Engineering Technology Research Institute, Longyan 364000, China)

(4 School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract A 7-DOF exoskeleton upper-limb rehabilitation robot is designed for the needs of rehabilitation training ability enhancement of arm movement disorders. The flat motors and harmonic reducers are used as drivers, and the shoulder joint is optimized. Compared with the traditional structure, the workspace proportion of the shoulder connecting rod mechanism is reduced by 45.97%, and the structural stiffness is improved. Forward and inverse kinematics of the robot are solved and verified by the D-H parameter method. The Monte Carlo method is used to analyze the workspace of the robot to prove the rationality of the structure design. The Matlab robot toolbox is used to simulate the trajectory of the robot end. The results show that the angular displacement, angular velocity and angular acceleration of each joint change continuously and smoothly respectively during the movement of the robot, which verifies the rationality and effectiveness of the robot, and the exoskeleton upper limb robot meets the requirement of human arm rehabilitation training and exercise capacity enhancement.

Key words Upper limb rehabilitation robot Structural optimization Kinematics Workspace Trajectory simulation

0 引言

随着现今社会人口的老龄化,因病痛、事故等导致运动弱化或失能的人群日益增多,其日常生活

通常难以自理。因此,对失能或弱化部位进行康复训练,恢复其正常生活是极其必要的。传统训练是患者定期去医院由专业医护人员手动进行重复的被

动性康复训练,费时费力^[1]。患者对康复训练机器人的需求急剧增加,且机器人能长时间重复运作并实时记录训练数据,提升训练效率,降低人力成本。因此,研究用于帮助上肢运动障碍患者进行康复训练的机器人具有重要意义^[2]。

目前,国内外研究的外骨骼上肢机器人的驱动方式主要有电动机驱动、绳驱动、气动驱动等,自由度一般为3~7个^[3]。Oliveira等^[4]设计的Harmony通过内部传感器可测得动作捕捉难以获取的运动数据,且精度接近动作捕捉。Masia等^[5]设计的MIT-MANUS多次迭代,已经增加了手部模块等。徐晨阳等^[6]提出了一种适用于上肢外骨骼机器人的穿戴机构,将欠驱动技术和柔性机构应用于绳驱动并联外骨骼上,提高了建模精度、不同穿戴者的适应性、运动的安全性及穿戴的舒适性。赵彤彤等^[7]提出了一种新型7自由度上肢外骨骼机器人,用一种新型手部固定装置代替传统握杆,可使腕部得到更好的训练。然而,上述设计多采用普通电动机和减速器,电动机轴向尺寸大,整机质量重。本文针对上肢手臂运动障碍康复训练的需求,设计了一种7自由度外骨骼上肢机器人,可帮助患者手臂改善关节活动度,缓解关节挛缩,锻炼上肢肌力,消除肌紧张等,最终使患者手臂恢复至正常水平。采用扁平形电动机与谐波减速器,优化了肩部连杆机构,在提升结构刚度的同时使结构更加紧凑。

在机器人设计过程中,需验证其结构及运动模型的合理性。本文使用Matlab分析了优化前后肩部连杆机构同一点的工作空间;在相同条件下对优化前后肩部连杆机构进行了有限元分析;通过D-H参数法建立机器人的运动学模型,对其正、逆运动学进行了求解并验证;使用蒙特卡洛法绘制了机器人末端工作空间;通过设置机器人的始末关节角,进行了运动轨迹仿真。

1 结构设计及肩部结构优化

通过分析人体上肢手臂结构可知,人体手臂可分为肩部、大臂、肘部、小臂、腕部及手掌。肩部和腕部可视为3自由度球形关节,肘部视为单自由度旋转关节。在不考虑手掌的情况下,设计的一种7自由度外骨骼上肢机器人如图1所示。

1.1 结构设计

设计的外骨骼上肢机器人总体采用单臂结构,由7个转动关节组成,每个关节由独立电动机驱动。

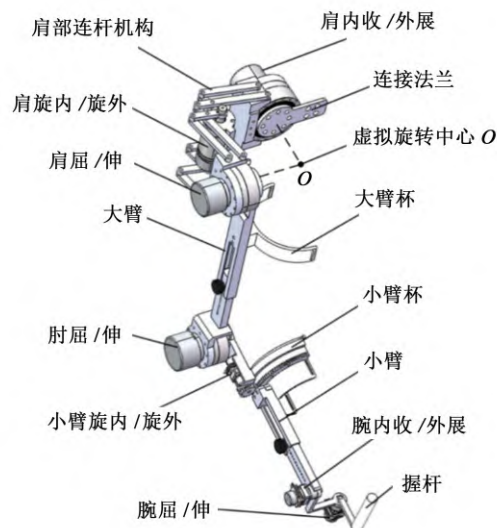


图1 康复机器人三维模型

Fig. 1 3D model of the rehabilitation robot

如图2(a)所示,肩部关节由平行四边形-菱形-平行四边形连杆机构连接3个转动关节构成,其轴线交于虚拟旋转中心 O 点,电动机1、电动机3分别绕其轴线 l_1 、 l_3 旋转,实现肩的内收/外展及屈/伸,电动机2驱动连杆机构绕轴线 l_2 旋转,实现肩的旋内/旋外;如图2(b)所示,肘部屈/伸由电动机4直接驱动;如图2(c)所示,电动机5驱动小齿轮带动小臂杯上的大齿轮绕其轴线 l_4 旋转,实现小臂的旋内/旋外,电动机6、电动机7分别绕其轴线 l_5 、 l_6 旋转,实现腕的内收/外展及屈/伸,3关节轴线交于腕部中心 W 点;如图2(d)所示,大臂、小臂均可手动调节长度,以适应不同佩戴者。各关节运动方式、驱动方式及运

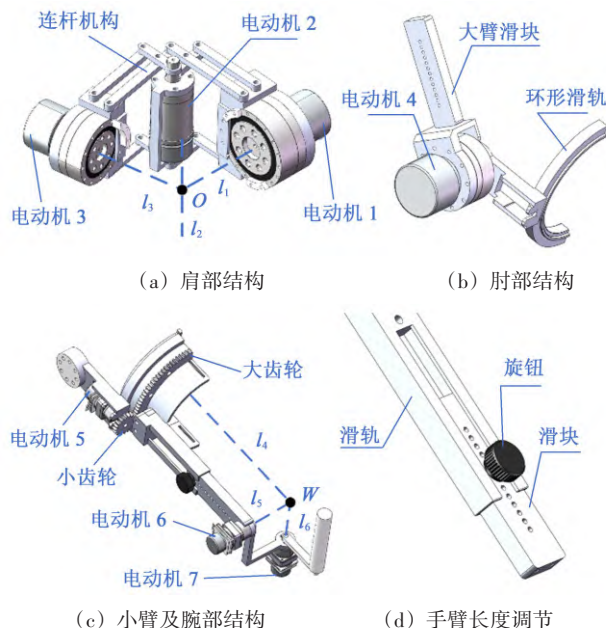


图2 结构设计

Fig. 2 Structural design

动范围如表1所示。

表1 关节信息

Tab. 1 Joint information

关节	运动方式	驱动方式	运动范围/(°)
肩关节	内收/外展	电动机驱动	-180~30
	旋内/旋外	电动机驱动	-150~-60
	屈/伸	电动机驱动	-90~130
肘关节	屈/伸	电动机驱动	-210~-90
腕关节	旋内/旋外	电动机驱动	-85~85
	内收/外展	电动机驱动	-110~-70
	屈/伸	电动机驱动	-60~60

其中,设计重点为肩部结构。肩部设计使用一种八连杆机构,巧妙地将肩旋内/旋外关节远离旋转轴线 l_2 ,为人体佩戴留出空间,使机器人在运行过程中更加灵活且不易与人体发生碰撞;避免了大多数普通肩部结构采用的纯串联设计^[8],把肩旋内/旋外关节直接设置在轴线 l_2 上,易造成机器人与人体有较大概率发生碰撞的现象。此外,本文所设计机器人各关节轴线与人体各关节轴线吻合,可以减少摩擦、降低不适感;大臂、小臂可调节长短,适应不同佩戴人群,符合人体工学设计。

电动机和减速器分别选择扁平式电动机与谐波减速器(肩旋内/旋外关节除外),与传统电动机和减速器相比,质量较轻,结构紧凑。各杆件及法兰的材料选用铝合金,大臂杯、握杆及小齿轮的材料选用尼龙,大齿轮的材料选用灰铸铁,其总质量为1.72 kg。包含电动机及减速器,整机质量为5.69 kg。

1.2 肩部结构优化

传统双平行四边形肩部结构^[9-11]具有以下特点:相对较大的运动范围,且在运动范围内无奇异性;整体刚度高,质量轻。但整个肩部结构体积较大,如图3(a)所示。针对该问题,对肩部结构进行优化设计,用平行四边形-菱形-平行四边形替代双平行四边形结构,如图3(b)所示。由图3可知,优化前后肩旋内/旋外活动范围不变,即肩屈/伸时,电动机上一点C绕肩部虚拟旋转中心O的运动轨迹弧CC'并未改变。优化后肩部连杆机构更加紧凑,所占空间小。其优化效果可由优化前后肩部结构的体积减少率和结构刚度来体现。

如图3所示,分别取优化前后连杆机构上对应位置点 A_1 、 A_2 ,其运动轨迹分别为弧 A_1A_1' 、弧 A_2A_2' ,其在 xOy 平面的轨迹方程为

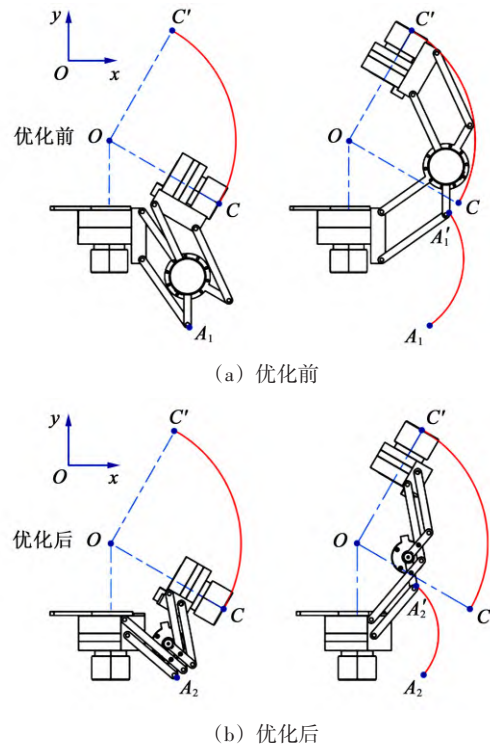


图3 肩部结构对比

Fig. 3 Comparison of the shoulder structure

$$\begin{cases} (y_1 + 161.9)^2 + (x_1 - 45)^2 = 106.84^2 \\ 109.26 < x_1 < 156.84, -253.41 < y_1 < -97.61 \\ (y_2 + 120.65)^2 + (x_2 - 22.32)^2 = 80.7^2 \\ 79.95 < x_2 < 108, -176.28 < y_2 < -55.47 \end{cases} \quad (1)$$

如图4所示,弧 A_1A_1' 、弧 A_2A_2' 分别绕 y 轴旋转 θ (θ 为肩内收/外展关节旋转角)所形成的曲面1、曲面2即为点 A_1 、 A_2 的运动范围,而两曲面与 y 轴所围体积之比等价于肩部连杆机构所占空间之比。曲面与 y 轴所围体积公式为

$$V = \int_{y_a}^{y_b} \frac{7}{12} \pi x^2 dy \quad (2)$$

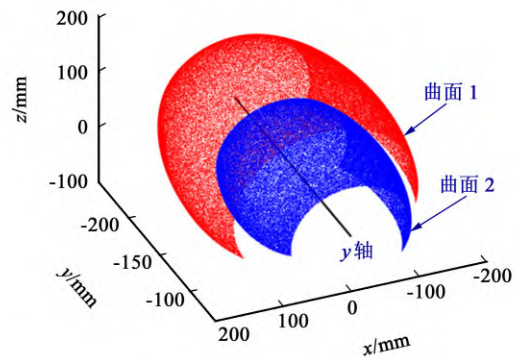


图4 优化前后A点工作空间点云图

Fig. 4 Nephogram of point A workspace before and after optimization

由式(1)、式(2)得

$$\left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \times 100\% = 45.97\%$$

即优化后肩部连杆机构空间占比减少45.97%。

为了分析优化前后肩部结构的结构刚度，在保留最基本的肩部连杆机构的情况下适当简化，通过Ansys仿真软件对优化前后肩部连杆机构进行刚度分析。如图5(a)所示，在固定面设置固定支撑，受力面设置图示方向、大小 $f=10\text{ N}$ 的均布载荷， θ_2 从 -150° 到 -60° ，每 5° 一个间隔，网格设置为四面体网格。图5(b)为其形变云图，红色区域为形变量最大位置。图5(c)所示为优化前后总形变，结果显示优化后结构形变波动小，且远小于优化前，说明其结构刚度更优。

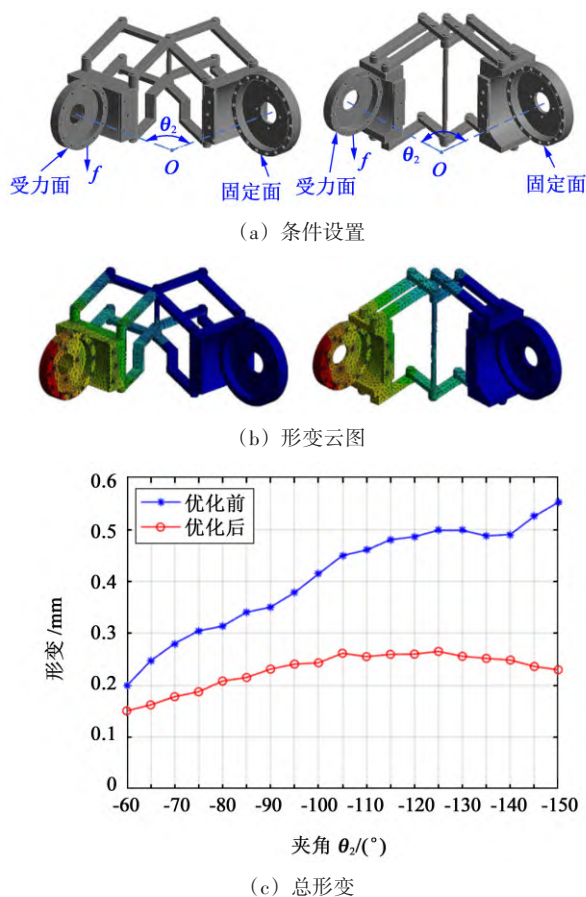


图5 肩部连杆机构优化刚度分析

Fig. 5 Optimized stiffness analysis of the shoulder linkage

综上所述，肩部连杆机构优化后较优化前在空间占比上减少45.97%，且结构刚度更优。

2 运动学分析及验证

为了研究机器人运动特性，建立其运动学模型并进行正、逆运动学求解。根据D-H参数法，简化机器人模型并以其初始姿态(人体手臂自然下垂时的姿态定义为机器人的初始姿态)建立对应连杆坐标系(图6)，D-H参数如表2所示^[12]。

表2 D-H参数

Tab. 2 D-H parameters

连杆 <i>i</i>	$\theta_i/(^\circ)$	d_i/mm	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^\circ)$
1	θ_1	0	0	$-\pi/2$
2	θ_2	0	0	$-\pi/2$
3	θ_3	0	0	$\pi/2$
4	θ_4	0	a_3	0
5	θ_5	d_5	0	$-\pi/2$
6	θ_6	0	0	$-\pi/2$
7	θ_7	0	0	$\pi/2$

表2中， θ_i 为关节角； d_i 为连杆偏距； a_{i-1} 为连杆长度； α_{i-1} 为连杆扭转角； a_3 为大臂长度，可调节范围为270~330 mm； d_5 为小臂长度，可调节范围为200~260 mm。

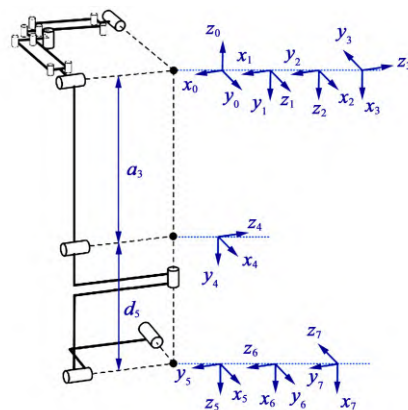


图6 连杆坐标系

Fig. 6 Coordinate system of the connecting rod

2.1 正运动学

正运动学是已知各关节角求机器人末端位姿。机器人的末端位姿可由各连杆变换矩阵相乘得到，代入表2中的D-H参数可得其运动方程。相邻连杆变换通式为

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， c 代表 \cos ； s 代表 \sin 。

机器人的运动学方程为

$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中，位置坐标为

$$\begin{cases} p_x = -a_3(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - d_5(s_1c_3s_4 + c_1c_2s_3s_4) \\ p_y = d_5s_2s_3s_4 - a_3s_2c_3 \\ p_z = -a_3(c_1s_3 + s_1c_2c_3) - d_5(c_1c_3s_4 - s_1c_2s_3s_4) \end{cases} \quad (5)$$

式中, s_i 为 $\sin \theta_i$ 的简写; c_i 为 $\cos \theta_i$ 的简写; s_{ij} 为 $\sin(\theta_i + \theta_j)$ 的简写; c_{ij} 为 $\cos(\theta_i + \theta_j)$ 的简写。

正运动学验证如下:

以机器人初始姿态为例, 此时, 关节角 $q_1 = [0 \ -\pi/2 \ \pi/2 \ -\pi/2 \ \pi/2 \ -\pi/2 \ 0]$, a_3 取 330 mm, d_5 取 260 mm, 代入式(3)、式(4), 由 Matlab 计算得

$${}^0T_7 = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & -1.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -1.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -590.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

由图6易得机器人末端位姿为

$${}^0T_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -590 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

结果表明, 正运动学方程正确。

2.2 逆运动学

逆运动学是已知末端位姿求各关节角。由于外骨骼上肢机器人是按照人体生理结构设计的, 会存在1个冗余自由度使机器人手臂在肘部产生自运动, 所以, 需进行自运动分析^[13-15]。

如图7所示, 设肩关节为S, 肘关节为E, 腕关节为W。当末端位姿固定时, 肘部E会绕SW旋转, E点轨迹形成的圆周称为冗余圆周, 其半径称为冗余半径。取E点最低时为起始点, 设其绕圆心F转过的角度为臂形角 φ , 臂形角则决定了肘部空间中的位置。

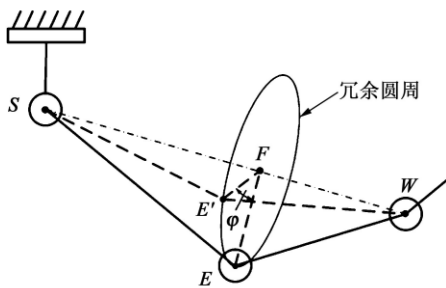


图7 肘关节自运动示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the elbow joint self-motion

图8所示为侧面观察机器人时的构型, B表示基座, 与关节1相接。记点S、W的位置向量分别为

$$P_S = [0, 0, 0]^T \quad (6)$$

$$P_W = [p_x, p_y, p_z]^T \quad (7)$$

由自运动分析可知, θ_4 的大小与臂形角无关, 只与肩关节和腕关节的位置有关。由式(6)、式(7)可得S、W的距离 d_{SW} , 当末端位姿确定时, 可得 θ_4 为

$$\theta_4 = -\frac{\pi}{2} \pm (\pi - \arccos \frac{a_3^2 + d_5^2 - d_{SW}^2}{2a_3d_5}) \quad (8)$$

其他关节角的求解如下:

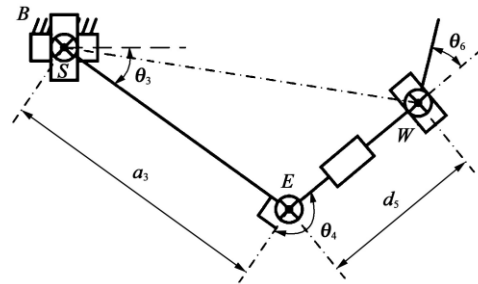


图8 机器人一般位置构型

Fig. 8 General position configuration of the robot

由于肘关节的圆周运动, S、E、W这三点组成的臂平面绕SW的连线旋转, 而腕关节3个关节角变化不改变腕关节位置, 且当W位置确定时, 可确定 θ_4 。由此可得, 影响臂平面姿态的关节变量为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。如图9所示, 建立坐标系M, 建立过程如式(9)所示。

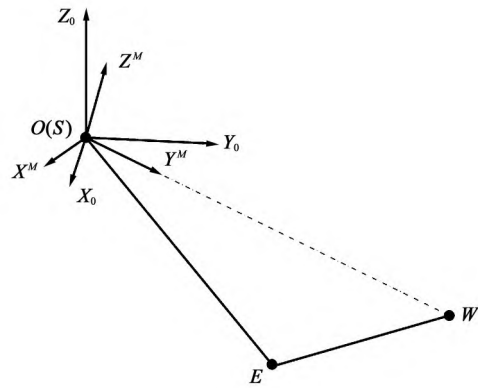


图9 坐标系M的建立

Fig. 9 Establishment of the coordinate system M

$$\begin{cases} X^M = \frac{Z_0 \times Y^M}{\|Z_0 \times Y^M\|} \\ Y^M = \frac{d_{SW}}{\|d_{SW}\|} \\ Z^M = X^M \times Y^M \end{cases} \quad (9)$$

当前3个关节角都为0时, 记此时的坐标系M为 M_0 , 此时, 腕关节位置为

$$P_W = \begin{bmatrix} a_3 + d_5 \cos(-\theta_4 - \frac{\pi}{2}) \\ 0 \\ d_5 \sin(-\theta_4 - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(6)和式(10)可得

$$d_{SW} = P_W - P_S \quad (11)$$

把 $Z_0 = [0, 0, 1]^T$ 和式(11)代入式(9)得到

$$M_0 = [X^{M_0} \ Y^{M_0} \ Z^{M_0}] \quad (12)$$

前3个关节分别转动角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ，记此时的坐标系为 M_2 ；当 $\varphi=0$ 时，记此时的坐标系为 $M_2^{\varphi=0}$ ，把式(6)、式(7)代入式(9)可求得 $M_2^{\varphi=0}$ ， $M_2^{\varphi=0}$ 绕自身坐标系的Y轴旋转 φ 角后可得 M_2 ，即

$$M_2 = M_2^{\varphi=0} \times R_{\text{Rot}}(y, \varphi) \quad (13)$$

肩部3个关节姿态的变换公式为 R_s ， $R_s \times M_0 = M_2$ ，由于 M_0 、 M_2 是正交矩阵，则

$$R_s = M_2 \times M_0^T = M_2^{\varphi=0} \times R_{\text{Rot}}(y, \varphi) \times M_0^T \quad (14)$$

又据运动学方程式(4)可得

$$R_s = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 - s_1 s_3 & -s_1 c_3 - c_1 c_2 s_3 & c_1 s_2 \\ -s_2 c_3 & s_2 s_3 & c_2 \\ -c_1 s_3 - s_1 c_2 c_3 & s_1 c_2 s_3 - c_1 c_3 & -s_1 s_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

由式(14)与式(15)各元素对应相等，可求得 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为

$$\begin{cases} \theta_2 = \pm \arccos [R_s(2, 3)] \\ \theta_1 = \arctan 2 [\mp R_s(3, 3), \pm R_s(1, 3)] \\ \theta_3 = \arctan 2 [\pm R_s(2, 2), \mp R_s(2, 1)] \end{cases} \quad (16)$$

机器人的末端姿态矩阵记为 0R_7 ，腕部3个关节姿态变换矩阵记为 R_w ，有

$$R_w = (R_s \times {}^3R_4)^T \times {}^0R_7 \quad (17)$$

R_w 也可由式(4)获得。同理，其与式(17)对应相等，可求得 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 分别为

$$\begin{cases} \theta_6 = \pm \arccos [R_w(2, 3)] \\ \theta_5 = \arctan 2 [\mp R_w(3, 3), \pm R_w(1, 3)] \\ \theta_7 = \arctan 2 [\pm R_w(2, 2), \mp R_w(2, 1)] \end{cases} \quad (18)$$

综上，根据末端位姿矩阵 0T_7 和臂形角 φ ，可求得8组解，在给定的机器人关节角范围内规定 θ_2 、 θ_4 、 θ_6 的正负值，可得其唯一分析逆解。

逆运动学验证如下：

$$\text{给定 } {}^0T_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -590 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \varphi=0$$

据上述推导过程，在Matlab中编程计算得出8组解，再通过确定 θ_2 、 θ_4 、 θ_6 的正负值，得其唯一解为 $q=[0.0000 \quad -1.5708 \quad 1.5708 \quad -1.5708 \quad 1.5708 \quad -1.5708 \quad 0.0000](\pi \text{取} 3.1416)$ ，其与 q_1 相等，证明运动学逆解正确。

3 工作空间分析

机器人的工作空间是指机器人能够达到并执行任务的所有位置和方向的集合。机器人的工作空间通常由其机械结构、运动范围和控制系统的的能力决定。为

了验证机器人运动过程是否与人体上肢的实际运动相符，本文在机械结构确定并给定各关节角运动范围的情况下，使用蒙特卡洛法对机器人工作空间进行分析^[16]。通过表2中D-H参数，在Matlab机器人工具箱中建立对应机器人模型，利用rand函数，有

$$\theta_i = \theta_i^{\min} + (\theta_i^{\max} - \theta_i^{\min}) \text{rand}(N, 1), \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (19)$$

代入式(5)进行相应的运算， N 取100 000次，得采样点构成的工作空间三维点云图及三视平面投影，如图10所示。

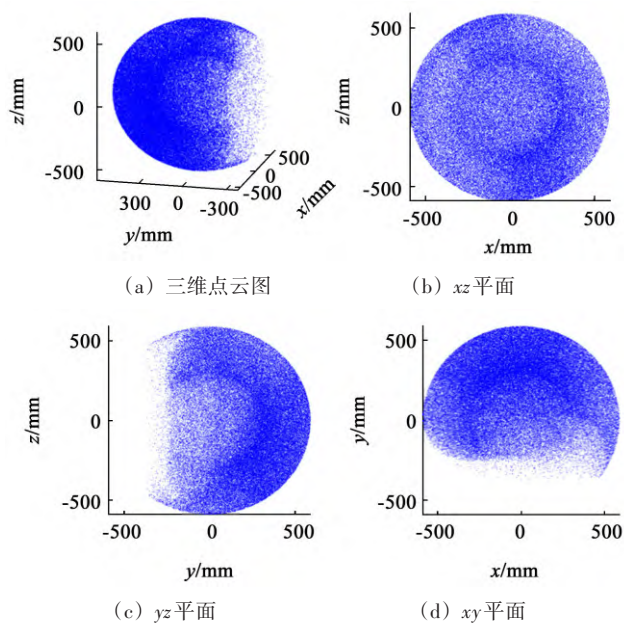


图10 工作空间
Fig. 10 Workspace

由图10得，机器人末端运动范围为： $-590 \text{ mm} \leq X \leq 590 \text{ mm}$ ； $-374 \text{ mm} \leq Y \leq 590 \text{ mm}$ ； $-590 \text{ mm} \leq Z \leq 590 \text{ mm}$ 。由此可知，受关节角度限制，机器人末端难以到达其后部空间，与人体手臂(右臂)实际活动空间范围基本一致，符合人体上肢康复训练的运动空间要求，证明了机器人结构设计的合理性。

4 运动轨迹仿真

在进行康复训练时，需按训练方法制定相应训练动作，让机器人沿特定轨迹运动，轨迹需连续、平滑、稳定，这可通过机器人运动过程中各关节角的角位移、角速度、角加速度的变化来体现。使用Matlab中jtraj(q_1 , q_2 , t)函数进行五次多项式插值对机器人轨迹进行仿真，使其从初始位姿运动到目标位姿。起点关节角为 $q_1=[0 \quad -\pi/2 \quad \pi/2 \quad -\pi/2 \quad \pi/2 \quad -\pi/2 \quad 0]$ ，终点关节角为 $q_2=[-\pi/4 \quad -2\pi/3 \quad \pi/6 \quad -7\pi/6 \quad 5\pi/18 \quad -\pi/2 \quad -\pi/9]$ ，运动时间 t 为2 s，结果如图11所示。

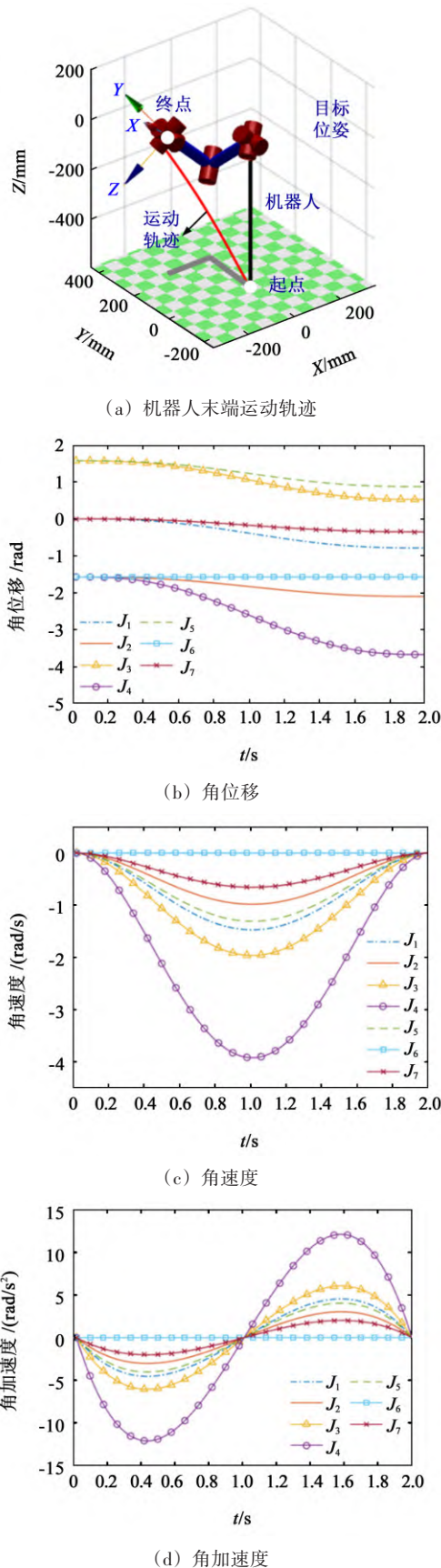


图11 轨迹仿真

Fig. 11 Trajectory simulation

由图11可知, 机器人末端的运动轨迹、角位移、角速度及角加速度的变化过程平缓且连续, 无较大

振动, 速度及加速度无突变, 证明了机器人结构设计的有效性。

5 结论

针对手臂偏瘫患者进行康复训练的需求, 设计了7自由度外骨骼上肢康复机器人。为使机器人整体更加轻便、紧凑, 运动关节采用扁平式电动机和谐波减速器驱动, 并对肩部连杆机构进行优化, 使其相对运动空间占比减少45.97%, 且优化后肩部结构刚度更优。通过D-H参数法建立机器人运动学模型, 进行了正、逆运动学求解及验证; 通过蒙特卡洛法分析了机器人末端工作空间, 证明结构设计的合理性; 在Matlab中对机器人进行了运动轨迹仿真。结果表明, 机器人运动过程平缓且连续, 速度和加速度无突变, 验证了机器人设计的有效性, 满足人体手臂康复训练要求。

参 考 文 献

- [1] MURPHY M A, RESTGHINI C, FEYS P, et al. An overview of systematic reviews on upper extremity outcome measures after stroke [J]. BMC Neurology, 2015, 15(1): 292.
- [2] 王开放, 曹慧, 邢蒙蒙, 等. 康复外骨骼机器人在肢体康复中的应用进展[J]. 机械传动, 2022, 46(4): 10-21.
WANG Kaifang, CAO Hui, XING Mengmeng, et al. Application progress of rehabilitation exoskeleton robot in limb rehabilitation [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(4): 10-21.
- [3] GULL M A, BAI S, BAK T. A review on design of upper limb exoskeletons [J]. Robotics, 2020, 9(1): 16.
- [4] OLIVEIRA A D, WARBURTON K, YUN Y, et al. Arm kinematics estimation with the harmony exoskeleton [C]//2017 International Symposium on Wearable & Rehabilitation Robotics (WeRob), 2017: 1-2.
- [5] MASIA L, KREBS H I, CAPP A P, et al. Whole-arm rehabilitation following stroke: hand module [C]//IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics & Biomechanics. IEEE, 2006: 1085-1089.
- [6] 徐晨阳, 张建斌, 陈伟海, 等. 绳驱动上肢外骨骼康复机器人穿戴机构设计[J]. 机器人, 2021, 43(4): 463-472.
XU Chenyang, ZHANG Jianbin, CHEN Weihai, et al. Design of the fixation mechanism for a cable-driven upper-limb exoskeleton rehabilitation robot [J]. Robot, 2021, 43(4): 463-472.
- [7] 赵彤彤, 章悦, 曹港生, 等. 一种新型7自由度上肢康复外骨骼机器人的结构设计和运动学仿真[J]. 机械传动, 2022, 46(2): 66-72.
ZHAO Tongtong, ZHANG Yue, CAO Gangsheng, et al. Structural design and kinematics simulation of a novel 7-DOF upper limb rehabilitation exoskeleton robot [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(2): 66-72.
- [8] 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.
- GUO Jian, LIAO Taiming, ZHENG Xingqiang. Kinematics calculation and simulation of wearable upper limb rehabilitation robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(3): 78-84.
- [9] CHRISTENSEN S, BAI S. Kinematic analysis and design of a novel shoulder exoskeleton using a double parallelogram linkage[J]. Journal of Mechanisms and Robotics: Transactions of the ASME, 2018, 10(4): 1-10.
- [10] KUMAR S, SIMNOFSKE M, BONGARDT B, et al. Integrating mimic joints into dynamics algorithms—exemplified by the hybrid Recupera exoskeleton[C]//Advances in Robotics (AIR 2017). ACM, 2017, 27: 1-6.
- [11] BAI S, CHRISTENSEN S, ISLAM M. An upper-body exoskeleton with a novel shoulder mechanism for assistive applications[C]//2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2017: 1041-1046.
- [12] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 32-42.
- XIONG Youlun. Fundamentals of robotics[M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 32-42.
- [13] BRAHMI B, SAAD M, RAHMAN M H, et al. Cartesian trajectory tracking of a 7-DOF exoskeleton robot based on human inverse kinematics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017: 600-611.
- [14] 高春艳, 唐家豪, 吕晓玲, 等. 一种冗余机械臂的简化运动学求解方法[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(8): 1191-1196.
- GAO Chunyan, TANG Jiahao, LÜ Xiaoling, et al. A simplified kinematics solution method for redundant manipulator[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(8): 1191-1196.
- [15] 张广浩. 上肢康复外骨骼机器人设计与系统仿真研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019: 30-35.
- ZHANG Guanghao. Design and system simulation of upper limb rehabilitation exoskeleton robot[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019: 30-35.
- [16] 徐振邦, 赵智远, 贺帅, 等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进和体积求取[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2703-2713.
- XU Zhenbang, ZHAO Zhiyuan, HE Shuai, et al. Improvement of Monte Carlo method for robot workspace solution and volume calculation[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(11): 2703-2713.

收稿日期: 2023-03-10 修回日期: 2023-03-23

基金项目: 厦门市产学研项目(2022CX0403)

龙岩市厦龙工程技术研究院科技特派员工作站项目
(2022MXN03)

作者简介: 刘佳俊(1996—), 男, 江西景德镇人, 硕士研究生; 主要研究方向为上肢康复机器人; 1592962945@qq.com。

通信作者: 张欣波(1970—), 男, 辽宁辽阳人, 硕士, 高级工程师/高级实验师, 硕士研究生导师; 主要研究方向为数控技术及智能制造; zhangxinbo@xmut.edu.cn。

(上接第61页)

- [6] CHAUHAN M, DESHPANDE N, CALDWELL D G, et al. Design and modeling of a three-degree-of-freedom articulating robotic microsurgical forceps for transoral laser microsurgery[J]. Journal of Medical Devices, 2019, 13(2): 021006.
- [7] SALISBURY J J K, MADHANI A J, GUTHART G S, et al. Master having redundant degrees of freedom: US2003023346[P]. 2004-01-30.
- [8] WISANUVEJ P, GRAS G, LEIBRANDT K, et al. Master manipulator designed for highly articulated robotic instruments in single access surgery[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017: 209-214.
- [9] WANG T, PAN B, FU Y, et al. Design of a new haptic device and experiments in minimally invasive surgical robot[J]. Computer Assisted Surgery, 2017, 22(Suppl.1): 240-250.
- [10] LIANG Y, SUN L, DU Z, et al. Mechanism design and optimization of a haptic master manipulator for laparoscopic surgical robots[J]. IEEE Access, 2019, 7: 147808-147824.
- [11] LI J H, WANG X S, XING Y, et al. Optimization algorithm for operation comfortability of master manipulator of minimally invasive surgery robot[J]. Transactions of Tianjin University, 2016, 22(2): 95-104.
- [12] LEI Y, LI Y, SONG R, et al. Design and experimental validation of a master manipulator with position and posture decoupling for laparoscopic surgical robot[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2022, 18(4): 2398.
- [13] 桑宏强, 安达, 张新建. 主操作手结构设计及运动学参数标定[J]. 机械传动, 2019, 43(10): 56-61, 86.
- SANG Hongqiang, AN Da, ZHANG Xinjian. Structure design and kinematics parameter calibration of master manipulator[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(10): 56-61, 86.
- [14] 安达. 六自由度主操作手建模与控制研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019: 14.
- AN Da. Research on modeling and control of six degrees of freedom master manipulator[D]. Tianjin: Tiangong University, 2019: 14.
- [15] GOSSELIN C, ANGELES J A. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 220-226.
- [16] 王成非, 陈贺, 刘东. 多自由度并联机构运动性能分析及尺寸优化[J]. 机电工程技术, 2022, 51(8): 245-249.
- WANG Chengfei, CHEN He, LIU Dong. The kinematic performance analysis and size optimization of MDOF parallel mechanism[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(8): 245-249.

收稿日期: 2023-02-26 修回日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(N51975409)

作者简介: 刘芬(1982—), 女, 江西武宁人, 高级实验师; 主要研究方向为智能机器人技术; liufen@tiangong.edu.cn。

通信作者: 桑宏强(1978—), 男, 河北隆化人, 博士, 教授; 主要研究方向为智能机器人技术、机械系统动力学与控制; songhongqiang@tiangong.edu.cn。