

基于指数积的上肢康复机器人运动学分析*

李宏亮^{1,2,3} 兰 陟^{1,2,3,4} 王 强^{1,2,3} 王 丽^{1,2,3}

摘要

目的:为了简化上肢康复机器人构型分析,清晰描述上肢康复机器人末端相对基坐标系的位姿描述。

方法:基于旋量理论计算出各关节相对基坐标系的旋量坐标,采用指数积形式,给出了上肢康复机器人末端运动学方程。在给定杆长和关节角度限制范围情况下,采用蒙特卡洛法对末端运动空间进行了仿真分析并利用 Matlab 绘制了末端运动空间随机位置点云图。

结果:采用指数积形式建立的末端运动学方程表达方式简单,计算出的位置随机点云图可近似逼近真实运动空间。

结论:旋量坐标将上肢康复机器人各关节运动关系描述统一化,几何概念清晰、物理意义明确。蒙特卡洛计算方法随机、快速的在各关节转角限制范围内进行取值并组合,能够简化计算过程,可通过增加随机点选取数量获得更加精确的运动空间。

关键词 上肢康复机器人;旋量理论;蒙特卡洛法;运动空间;点云

中图分类号:R496 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2019)-10-1199-03

近年来,我国人口老龄化进程不断加速,因衰老、疾病等原因引发老年人上肢运动功能障碍的数量也在不断增加。为满足老年人、残障人上肢康复服务需求,上肢康复机器人辅助训练已逐步运用到临床,成为机器人领域与康复医学领域的研究热点。上肢康复机器人可大体分为两类,一类为末端牵引式,一类为外骨骼式^[1-4]。外骨骼式上肢康复机器人通常基于仿生原理进行设计,机械主体机构多为典型的多自由度开链串联式工业机器人机构,是一种典型的人机合作系统,肩、肘关节多数模拟人体上肢对应关节分布特征布置,在康复训练过程中,需要确保人机对应关节轴线或轴心保持对齐或重合,对上肢康复机器人进行运动学分析是十分必要的。其中,D-H参数法被广泛应用,可将参考坐标系分配至每根连杆上。按一定规律建立各连杆坐标系后,确定出用于运动学描述的连杆长度、连杆扭转角、关节距离和关节角度四个参数,但因该方法存在不足,改进D-H参数法被提出^[5]。旋量分析法清晰的描述了任何刚体沿着某轴线单一平动和绕该轴单一旋转的合成运动,结合刚体的运动规律,利用李群李代数、旋量和矩阵运算等数学手段,提供了机器人运动学方程的几何表示方法,简化机器人构型分析等优点,以其独特优势逐渐成为机器人学研究的有效分析工具^[6-9]。同

时,运动学分析也是运动空间问题研究的必要前提。上肢康复机器人运动空间是在各关节转动角度限制范围内,末端(手部)所能到达点的集合,是康复机器人工作能力的重要运动指标,蒙特卡罗法是代表性分析方法之一,各关节变量在规定的范围内随机遍历取值后,依次计算末端随机点的集合。因此,本文基于旋量理论的指数积形式建立了6自由度(degree of freedom, DOF)上肢康复机器人运动学方程,该方法相对D-H参数法更为简单,只需建立基坐标系{B}和末端坐标系{H},几何概念清楚,物理意义明确。同时,利用蒙特卡洛法对上肢康复机器人的运动空间进行了初步研究,利用 Matlab 绘制了运动空间三维点云图。

1 运动学方程的建立

为了更好的模拟人体上肢运动,结合人体上肢结构生理学和康复医学理论,设计出一种6自由度上肢康复机器人,由6个转动副组成,是一种典型的串联型机构。其中:肩关节、上臂处设有3个串联的转动副,其轴线汇交于一点;肘关节、前臂和腕关节处各设有1个转动副;驱动电机直接布置在各关节处。在进行康复训练过程中,使用者将手握在或固定在康复机器人末端。同工业机器人类似,上肢康复机器人

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2019.10.012

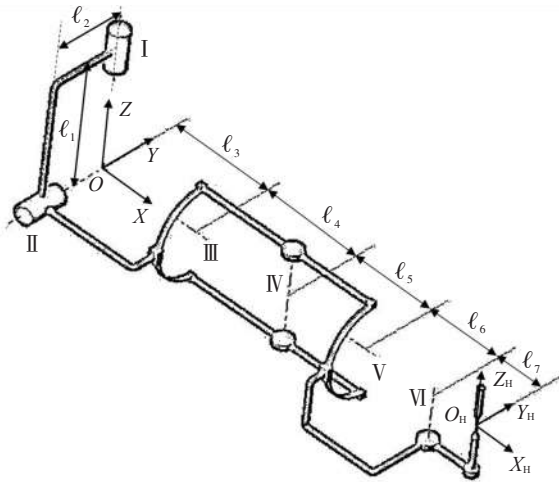
*基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1304100);国家康复辅具研究中心基本科研业务费项目(118009001000160001);北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金重点研究专题(L172050)

1 国家康复辅具研究中心,北京市 100176; 2 北京市老年功能障碍康复辅助技术重点实验室; 3 民政部神经功能信息与康复工程重点实验室; 4 通讯作者

作者简介:李宏亮,男,实习研究员; 收稿日期:2018-05-28

由若干连杆通过转动副连接而成的空间开链机构,在不考虑运动过程中产生的力和力矩情况下,描述上肢康复机器人末端运动实际上是描述各连杆的相对位姿关系,为描述各连杆相对位姿关系,首先建立基坐标系 OXYZ 和康复机器人末端坐标系 $O_H X_H Y_H Z_H$,分别记为坐标系 {B} 和坐标系 {H},如图 1 所示。

图 1 上肢康复机器人构型简图



当上肢康复机器人只有关节 1 绕轴 I 转动时,可看作单关节机器人。设轴 I 的矢量 $\omega=(\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$, $\omega \in \mathbb{R}^3$ 且 $\|\omega\|=1$, r 为轴上一点位置矢量,点 O_H 在坐标系 {B} 下的位置矢量为 $p(t)$ 。

令 $v=r \times \omega$, $\dot{\omega}=\omega \times$,同时引入 4×4 矩阵 $\hat{\xi}$,则 $\hat{\xi}$ 为:

$$\hat{\xi}=\left(\begin{array}{cc} \hat{\omega} & v \\ 0 & 1 \end{array}\right) \quad (1)$$

其中: $\hat{\omega}$ 为反对称阵,通过定义算 $\vee$,将矩阵 $\hat{\xi}$ 映射为 6 维向量 ξ ,即运动旋量的 Plücker 坐标形式,表示为:

$$\xi=\left(\begin{array}{cc} \hat{\omega} & v \\ 0 & 1 \end{array}\right)^{\vee}=\left(\begin{array}{c} \omega \\ v \end{array}\right) \quad (2)$$

点 O_H 的速度 $\dot{p}$ 可表示为:

$$\dot{p}(t)=\hat{\xi} p(t) \quad (3)$$

(3) 为时间 t 的一阶微分方程,其解为:

$$p(t)=e^{\hat{\xi} t} p(0) \quad (4)$$

其中: $p(0)$ 为点 O_H 在坐标系 {B} 下的初始位置矢量, $e^{\hat{\xi} t}$ 为运动旋量的矩阵指数。

根据如图 1 所示坐标系,轴 I 的矢量 $\omega_1=(0 \ 0 \ 1)$,取轴上一点位置矢量 $r_1=(0 \ 0 \ l_1)$,经计算关节 1 的旋量坐标和矩阵指数为:

$$\xi_1=(001000)^T$$

$$e^{\hat{\xi}_1 \theta_1}=\left\{\begin{array}{ccc} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array}\right\} \quad (5)$$

当上肢康复机器人 6 个关节分别绕其轴线组合转动时,可将上述过程进行推广为:

$$g_{BH}(\theta)=\prod_{i=1}^6 e^{\hat{\xi}_i \theta_i} g_{BH}(0) \quad (6)$$

其中: $g_{BH}(\theta)$ 表示各关节转动相应角度 θ_i ($i=1,2,\dots,6$) 后末端的最终位姿,下标 B 代表基坐标系,下标 H 代表末端(手部)坐标系, $g_{BH}(0)$ 表示关节的初始位姿,表示为:

$$g_{BH}(0)=\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & l_s+l_q+l_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right) \quad (7)$$

其中: $l_s=l_3+l_4$, $l_q=l_5+l_6$,分别代表康复机器人上臂和前臂长度。

当各关节绕其轴线转角为 θ_i ,求解出各关节矩阵指数后代入(4),计算末端位置矢量 $p=(p_x, p_y, p_z)$ 。

2 末端运动空间分析

在康复训练过程中,末端(手部)运动空间指坐标系 {H} 的原点所能到达空间区域,其大小受连杆长度、各关节转动角度等限制因素约束。将区域内所有点的集合记为“D(p)”,在连杆长度已知情况下,关节转动角度限制范围与运动空间的关系表示为:

$$D(p)=\{P(\theta_i, \theta_i \in Q)\} \quad (8)$$

其中: Q 运动区域约束, $Q=\{\theta|\theta_i^d \leq \theta_i \leq \theta_i^m\}$,上肢康复机器人杆长长度和各关节转动角度限制范围见表 1—2。

采用蒙特卡洛法^[11-13],对上肢康复机器人末端运动空间进行仿真分析。在各关节转动角度范围内快速生成 N 个随机点,并对各关节变量生成的随机点进行组合。利用末端位置方程式,计算出末端在运动区域内一系列随机位置点,这些随机位置点构成的集合可近似逼近“D(p)”,逼近程度取决于各关节转动角度内随机点组合数量,随机点选取越多,则对应的组合数量就越多,计算出末端位置坐标值就越多,也就越能精确反应末端运动空间。本文取 N=50000,利用 Matlab 软件编程,计算出末端一系列随机位置点云图如图 2 所示。

根据运动空间点云图,可判断上肢康复机器人运动空间

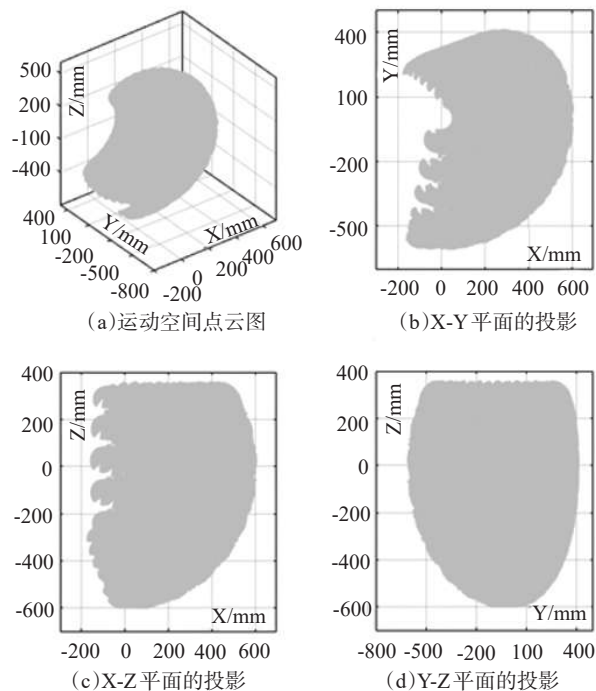
表 1 上肢康复机器人各杆杆长

连杆	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7
l_i/mm	180	180	150	150	125	110	70

表 2 各关节角度限制范围

关节	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
$\theta_i^d/^\circ$	-100	-30	-20	0	-80	-50
$\theta_i^m/^\circ$	20	80	20	90	15	40

图2 运动空间点云图及各平面内投影



是否满足康复需求,如果末端不能满足人体上肢活动空间要求,可对关节角度限制范围进行调节,不同的杆长长度和角度限制范围,对应不同运动空间。

3 结论

本文基于旋量理论,将上肢康复机器人每个关节相连的连杆运动描述为绕该关节轴线转动和沿该轴线平移的复合,计算出各关节相对基坐标系的旋量坐标,采用指数积形式,给出了上肢康复机器人末端运动学方程。末端的运动学方程,表达方式简单,提供了手部末端坐标系{H}相对基坐标系{B}下完整、明确的位姿描述。各关节旋量坐标由两个三维矢量组成,可以把运动关系描述统一化,易与矢量法、矩阵法相互转换,几何概念清晰、物理意义明确。同时,在杆长长

度和各关节角度限制范围已知情况下,采用蒙特卡洛法对末端运动空间进行了仿真分析。蒙特卡洛法是以概率统计理论为基础的数值法,在工程上被广泛应用,可随机、快速的在各关节转角限制范围内进行取值并组合,简化了计算过程。最后,利用Matlab绘制了末端运动空间随机位置点云图,该云图近似逼近于真实运动空间,近似逼近的精确程度与选取的随机点个数有关。

参考文献

- [1] 周媛,王宁华. 康复机器人概述[J]. 中国康复医学杂志,2015,30(4):400—403.
- [2] 胡鑫,王振平,王金超,等. 脑卒中上肢康复训练机器人的研究进展与展望[J]. 中国康复理论与实践,2014,20(10):901—904.
- [3] 杨启志,曹电锋,赵金海. 上肢康复机器人研究现状的分析[J]. 机器人,2013,35(5):630—640.
- [4] 张超,刘璇,侯增广,等. 上肢机器人辅助疗法对恢复期脑卒中患者上肢运动功能及日常生活活动能力的效果[J]. 中国康复理论与实践,2016,22(12):1365—1370.
- [5] 郭发勇,梅涛,赵江海. D-H法建立连杆坐标系存在的问题及改进[J]. 中国机械工程,2014,25(20):2710—2714.
- [6] Yang X, Wu L, Li J, et al. A minimal kinematic model for serial robot calibration using POE formula[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(3):326—334.
- [7] 戴建生. 机构学与旋量理论的历史渊源以及有限位移旋量的发展[J]. 机械工程学报,2015,51(13):13—26.
- [8] 冯春,吴洪涛,夏任波,等. 基于共形几何代数的6-DOF机器人运动学逆解[J]. 机械设计与研究,2018,34(1):69—75.
- [9] 宫金良,黄风安,张彦斐. 基于指数积的Delta机器人运动学正解建模[J]. 北京理工大学学报,2013,33(6):581—585.
- [10] 崔志宏,刁燕,韩磊,等. 机器人工作空间边界提取算法研究[J]. 机械传动,2016,40(2):85—87.
- [11] 李亚玮,黄晋英. 八自由度机械臂正运动学及工作空间分析[J]. 机械传动,2016,40(4):94—96.
- [12] 孙野,殷凤龙,王香丽,等. 六自由度机械臂运动学及工作空间分析[J]. 机床与液压,2015,43(3):76—81.
- [13] 李瑞霞,李粉霞,杨洁明,等. 基于D-H法的串联机械手臂工作空间分析[J]. 机床与液压,2015,43(21):70—73,152.