

王雪, 王殊轶, 马邦峰, 等. 基于坐位调膝法的仿生推拿机器人结构设计与实验研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(3): 39-47. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.250306

基于坐位调膝法的仿生推拿机器人结构设计与实验研究

王雪¹, 王殊轶¹, 马邦峰¹, 龚利², 邢华², 樊琳³, 王佳瑜¹, 康宁¹

(1 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2 上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院推拿科, 上海 200437;

3 上海市医疗器械检验研究院 国家药品监督管理局医用电气设备重点实验室, 上海 201318)

摘要: 为减轻推拿医生的劳动负荷, 增加膝骨关节炎患者的就诊机会, 本研究设计了一种基于坐位调膝法的仿生推拿机器人, 并对其进行了仿真分析与实验研究。首先, 使用改进 D-H 参数法建立运动学分析模型, 得到推拿机器人末端位姿表达式以计算其逆解。其次, 基于蒙特卡洛法对推拿机器人进行工作空间分析。然后, 通过采集实际推拿数据, 得到医生大拇指推力与患者膝盖弯曲角度的函数关系及拟合曲线的方程, 将其作为推拿机器人输出力控制的依据。最后, 制作推拿机器人样机并进行了按摩行程对比实验和模拟推拿实验, 验证了整体的可行性。研究结果为后续推拿机器人系统的设计及优化提供了重要的理论依据。

关键词: 膝骨关节炎; 坐位调膝法; 推拿机器人; 运动学分析

中图分类号: TP302

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)03-0039-09

Structural design and experimental research of bionic massage robot based on sitting knee adjustment method

WANG Xue¹, WANG Shuyi¹, MA Bangfeng¹, GONG Li², XING Hua², FAN Lin³, WANG Jiayu¹, KANG Ning¹

(1 School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2 Department of Massage, Yueyang Hospital of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine Affiliated to Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200437, China; 3 Shanghai Institute of Medical Device Testing, NMPA Key Laboratory for Medical Electrical Equipment, Shanghai 201318, China)

Abstract: In order to reduce the labor load of massage doctors and increase the opportunity of treatment for patients with knee osteoarthritis, a bionic massage robot based on sitting knee adjustment method is designed in this study, and its simulation analysis and experimental research are carried out. Firstly, the improved D-H parameter method is used to establish the kinematic analysis model, and the expression of the end pose of the massage robot is obtained to calculate its inverse solution. Secondly, based on Monte Carlo method, the work space of the massage robot is analyzed. Then, by collecting the actual massage data, the functional relationship between the doctor's thumb thrust and the patient's knee bending angle and the equation of the fitting curve are obtained, which is used as the basis of the output force control of the massage robot. Finally, the prototype of the massage robot is made and the massage stroke comparison experiment and simulated massage experiment are carried out to verify the overall feasibility. The research results provide an important theoretical basis for the design and optimization of the subsequent massage robot system.

Key words: knee osteoarthritis; sitting knee adjustment method; bionic massage robot; kinematic analysis

0 引言

近几十年来,中国的经济得到飞速发展,与此同

时人口老龄化带来的老年人健康问题也已不容小觑。在65岁以上老人中,有相当比例的人群罹患膝关节疾病,其中膝骨关节炎(Knee OsteoArthritis,

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目 2022 年第二批立项项目(220700487132405); 上海市申康三年行动计划资助(SHDC2020CR3096B); 上海理工大学联合培养基地项目(10-23-308-007)。

作者简介: 王雪(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向:康复机器人,人因工程设计,可用性测试,增强现实手术导航。

通信作者: 王殊轶(1972—),女,博士,副教授,主要研究方向:人因工程设计,可用性测试,增强现实/虚拟现实辅助医疗。Email:wangshuyi@usst.edu.cn。

收稿日期: 2023-08-31

KOA)最为常见,临床以膝关节疼痛、僵硬、活动受限为主症,严重时可导致膝关节肿胀和畸形。膝关节炎的治疗方法目前仅有手术、药物、推拿、针灸。北京市和平里医院骨科就曾经利用高位截骨术进行关节软骨修复^[1],其原理是将固定力线组植入膝关节内改善膝关节受力情况,从而达到缓解疼痛的目的。膝关节置换术^[2]也是常见的用于关节病变的治疗手段,但是此方法伴有假体受力不均,增加翻修的风险^[3]。手术治疗虽然见效快,但是对患者身体负担较大,特别是老年患者手术风险会更大,术后恢复效果也是因人而异。药物治疗一般是消炎药等缓解症状,但是长期的服药会给胃带来较大负担。现有研究指出,中医治疗主要利用针灸、推拿等手段,治疗效果显著,副作用小。

推拿是中医治疗手段的重要组成部分,可有效改善膝盖关节内压,放松膝关节周围肌肉^[4],从而达到镇痛和缓解膝关节疼痛的目的。上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院推拿科发明了坐位调膝法^[5],针对膝关节炎有不错的疗效。患者坐在椅子上,双脚并拢,与地面相平。治疗过程中医生以双手固定住患者小腿,使患者小腿呈解剖中立位。医生双手大拇指按压患者内外膝眼处,患者需缓缓站立,然后缓缓坐下。在此期间,医生双手大拇指同时发力向后顶按,如此重复3次。但是中医的推拿治疗属于体力劳动,医生长期给患者实施推拿治疗,手指多发生严重变形,手指关节也会受到不同程度的损害,长此以往,会缩短医生的职业寿命。对于患者来说,目前由于推拿医生少,排号久,所以耽误治疗的情况多有发生。中医推拿是经验学科,其推拿手法大多靠前辈言传身教,对推按手法的描述也以定性分析为主。对于学习者而言,手法的精确度和力度大多靠自己领悟力,教学效果并不稳定。

目前,国内外针对推拿机器人进行了大量研究。尹小琴等学者^[6]针对中医中振法、按法、揉法、滚法等推拿操作手法,设计了推拿机器人的并联机构末端执行器,根据推拿力度所需的驱动力参数进行机型优选,并通过三维建模、运动学分析、仿真验证等说明其运动学性能。彭金婵等学者^[7]设计了一款针对慢性肌肉骨骼疼痛患者的仿生柔性按摩机器人,可以实施推拿、艾灸、气罐等中医外治法,进行了样机制作并开展了性能评估实验,促进了中医现代化发展。Zhang^[8]研发了一款关节型推拿机器人EMMA,能够根据医师的相应的手法操作,同时还能将诊断结果传输至云端,实时了解患者的康复程度。

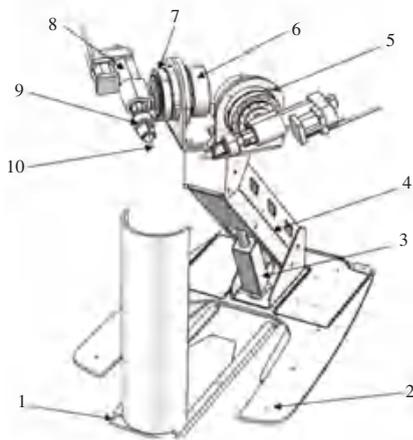
但是针对膝关节炎的仿生推拿装置却很少,市面上的关于膝关节按摩的设备大多是通过加热震动等起到理疗的作用,治疗效果不理想。

因此,本文基于坐位调膝法的生物力学特性研制了一款仿生推拿机器人,目的是辅助医生进行仿生推拿,减轻医生的劳动负荷,促进医学发展。本文对推拿机器人进行了运动学分析与工作空间仿真,并进行了行程对比实验和模拟推拿实验,将行程实验数据与运动仿真数据进行对比,分析结构误差。将样机输出力与医生输出力进行对比,分析样机输出力的特性,从而验证该装置对医生手法的复现程度。

1 仿生推拿机器人结构设计

1.1 总体结构设计

仿生推拿机器人的总体结构如图1所示。由图1可知,主要部件为L型腿部支架、底座、升降推杆、升降臂、电机固定板、关节电机、谐波减速器、仿生按摩推杆、压力传感器和按摩头。可分为升降结构、推拿结构以及腿部支架三部分。



1—L型腿部支架; 2—底座; 3—升降推杆; 4—升降臂; 5—电机固定板; 6—关节电机; 7—谐波减速器; 8—仿生按摩推杆; 9—压力传感器; 10—按摩头

图1 仿生推拿机器人结构总图

Fig. 1 General structure of bionic massage robot

1.2 升降结构设计

升降结构如图2所示。主要由升降推杆、升降臂以及底座组成,通过控制升降臂来实现仿生推拿机器人的上下平移。为增加整体稳定性,升降结构整体采用平行四边形的平面连杆机构设计思路。根据机器人的受力特点,在推拿过程中,升降臂与地面呈锐角能更好保证机器人的稳定性和使用寿命。

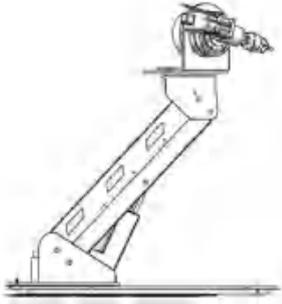


图 2 升降结构

Fig. 2 Lifting structure

1.3 推拿结构设计

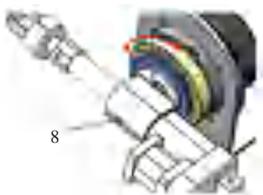
推拿结构由电机固定板、关节电机、谐波减速器、仿生按摩推杆、压力传感器以及按摩头组成。

仿生按摩推杆选用小行程推杆,推杆的前进和后退复现了医生手臂的前后平移自由度。在推杆前端有传感器支撑座、压力传感器、按摩头支架、按摩头和压力传感器组成仿生推拿手。按摩头支架为矩形镂空结构,给装配按摩头支架留出足够空间。按摩头和按摩头支架用螺纹连接。在按摩头的尖端贴有硅胶软头,使按摩头和患者接触为软接触,从而保护患者的安全。本研究选择 2 套结构如图 3(a)所示,复现医生的 2 个手臂推拿动作。关节电机和仿生推拿手通过推杆卡扣连接,如图 3(b)所示,通过电机带动推拿手旋转来实现医生拇指翻转自由度。



1—推杆; 2—传感器支撑座; 3—压力传感器; 4—按摩头支架; 5—按摩头

(a) 小行程推杆组件



(b) 翻转自由度示意图

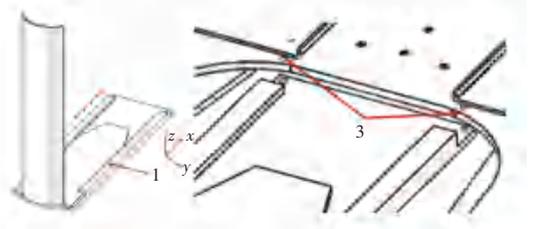
图 3 推拿结构

Fig. 3 Massage structure

1.4 腿部支架设计

腿部支架组件由 L 型支架和支架滑槽组成。为方便拆装,滑槽支架之间配合间隙是 1mm,滑槽和支架之间的滑动可由手动完成。1 处留有螺纹孔,当调整到合适位置后,用紧定手柄螺丝固定。滑

槽前端与底座相连,3 处设有 2 个通孔与底座预留的通孔用销连接。设计中滑槽和底座不在同一平面,存在一定间隙,此间隙用来放置橡胶垫片,如果地面水平度不够,刚性连接的底座和滑槽有折弯或者断裂的可能。L 型腿部支架组件主要作用是调节患者膝盖与按摩头之间的距离,如图 4 所示。



(a) L 型腿部支架组件 (b) 滑槽与底座连接图

图 4 腿部支架

Fig. 4 Leg brace

2 推拿机器人运动学分析

为进一步分析推拿机器人的结构特征,对其进行运动学分析以及工作空间分析,采用改进 Denavit-Hartenberg(D-H)法建立推拿机器人坐标系。

2.1 推拿机器人运动学模型的建立

采用改进 D-H 参数法^[6]建立推拿机器人的运动学模型,该推拿机器人的坐标系建立如图 5 所示。

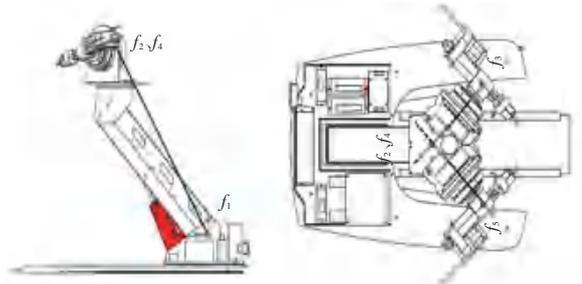


图 5 推拿机器人运动坐标系

Fig. 5 Massage robot motion coordinate system

结合改进 D-H 法建立的坐标系,建立所对应的 D-H 参数表(见表 1)。

表1 推拿机器人D-H参数表

Table 1 Massage robot D-H parameter table

关节编号	a_{i-1}	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i	$\theta_i/(^{\circ})$
1	0	0	0	θ_1
2	L1	-45	0	θ_2
3	0	-90	d_3	0
4	L1	-135	0	θ_4
5	0	90	d_5	0

表1中, a_{i-1} 表示沿着 x_{i-1} 轴,从 z_{i-1} 轴移动到 z_i 轴的距离; α_{i-1} 表示绕着 x_{i-1} 轴,从 z_{i-1} 轴转动到 z_i 轴的角度; d_i 表示沿着 z_i 轴,从 x_{i-1} 轴移动到 x_i 轴

$${}_{i-1}^{-1}\mathbf{T}(\theta_i, d_i, \alpha_{i-1}, a_{i-1}) = \begin{pmatrix} \hat{e} & \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} & \hat{u} \\ \hat{e} & \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i & \hat{u} \\ \hat{e} & \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i & \hat{u} \\ \hat{e} & 0 & 0 & 0 & 1 & \hat{u} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式(1)中矩阵的含义是在 $i-1$ 坐标系中表示坐标系的齐次变换矩阵。

通过齐次变换矩阵的连乘可得末端按摩推拿杆坐标系相对于基坐标系的表达:

$${}^0_3\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \hat{e} & \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 \sin \theta_2 & \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \cos \theta_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 \cos \theta_2 & L_1 \cos \theta_1 - d_3 (\cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 \cos \theta_2) & \hat{u} \\ \hat{e} & \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \sin \theta_2 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 & L_1 \sin \theta_1 - d_3 (\sin \theta_1 \sin \theta_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \cos \theta_2) & \hat{u} \\ \hat{e} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_2 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_2 & -\frac{\sqrt{2}}{2} d_3 \cos \theta_2 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0 & 0 & 0 & 1 & \hat{u} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$${}^0_5\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \hat{e} & \cos \theta_1 \cos \theta_4 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 \sin \theta_4 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_4 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 \cos \theta_4 & L_1 \cos \theta_1 + d_5 (\cos \theta_1 \sin \theta_4 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_4 \sin \theta_1) & \hat{u} \\ \hat{e} & \sin \theta_1 \cos \theta_4 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \sin \theta_4 & \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 & \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \cos \theta_4 + \sin \theta_1 \sin \theta_4 & L_1 \sin \theta_1 + d_5 (\sin \theta_1 \sin \theta_4 + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \cos \theta_4) & \hat{u} \\ \hat{e} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_4 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_4 & \frac{\sqrt{2}}{2} d_5 \cos \theta_4 & \hat{u} \\ \hat{e} & 0 & 0 & 0 & 1 & \hat{u} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.1.2 推拿机器人的逆运动学分析

当给定推拿机器人末端相对基坐标系的位置与姿态时求各关节的运动参数就是逆向运动学的求解过程^[8],即在上文12个超越方程的数值明确的情况下求解。本节以左臂来进行举例分析。

观察上文的超越方程不难得出 ${}^0_3\mathbf{T}(2,2) =$

距离; θ_i 表示绕着 z_i 轴,从 x_{i-1} 轴转动到 x_i 轴的角度。

对于转动关节,变量为关节角度 θ_i 。对于移动末端伸缩杆,变量为位移 d_i 。

2.1.1 推拿机器人的正运动学求解

在已知各关节运动参数的情况下,求解末端相对基坐标系的位姿就是正向运动学的求解过程^[7]。

由于该推拿机器人并不是串联链式结构,所以运动学分析分为左臂运动链和右臂运动链较为合理,关节1、2、3为一组,关节1、4、5为一组。根据所建立的D-H参数表,代入以下坐标系变换矩阵:

$${}^0_3\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T}_2 {}^1_2\mathbf{T}_3 \mathbf{T} \quad (2)$$

$${}^0_5\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T}_4 {}^1_4\mathbf{T}_5 \mathbf{T} \quad (3)$$

将对应D-H参数表中的参数代入可得 ${}^0_3\mathbf{T}$ 、 ${}^0_5\mathbf{T}$ 所对应的12个位姿超越方程如下:

$$-\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1, {}^0_3\mathbf{T}(1,2) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1, \text{进而可得 } \theta_1 = \arctan\left(-\frac{{}^0_3\mathbf{T}(1,2)}{{}^0_3\mathbf{T}(2,2)}\right)。$$

$$\text{通过 } {}^0_3\mathbf{T}(3,1) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_2, {}^0_3\mathbf{T}(3,3) = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_2,$$

可得 $\theta_2 = \arctan\left(\frac{{}^0T(3,1)}{{}^0T(3,3)}\right)$ 。

再观察 ${}^0T(1,4) = L_1 \cos \theta_1 - d_3 (\cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \cos \theta_2)$, 可得 $d_3 = \frac{L_1 \cos \theta_1 - {}^0T(1,4)}{\cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1 \cos \theta_2}$ 。

通过逆运动学解算, 可以求解出对应的关节变量。

2.2 工作空间可视化分析

机械臂的工作空间是指末端执行器的工作点所能到达的位置的坐标集合, 工作空间的大小和空间规划是体现装置工作能力的重要指标^[9]。装置工作空间研究中常用的方法有几何法、解析法和数值法, 而蒙特卡罗法就是典型的数值计算方法。该方

法主要通过统计试验、随机取样, 来处理统计问题模型的模拟结果, 进而给出仿生机械臂的有效评估^[10]。

基于蒙特卡罗法对推拿机器人工作空间进行求解, 调整随机点数, 样本数为 3 500 时, 得到机器人三维空间仿真结果如图 6 所示。

给定推拿装置的转动关节的限位为 $\left[-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}\right]$, 推拿杆行程为 0~50 mm。从 xoy 平面图看出, 推拿手末端的前后向运动范围达到 488~625 mm; 从 xoz 平面图看出, 单臂末端的左右运动范围在 0~35 mm 左右; 从 yoZ 平面图看出, 推拿手末端的上下方向运动范围在 -294~334 mm 左右; 人体膝盖左右按摩区域大致是一个 -20~30 mm 的长方形区域。此推拿机器人的工作空间满足要求。

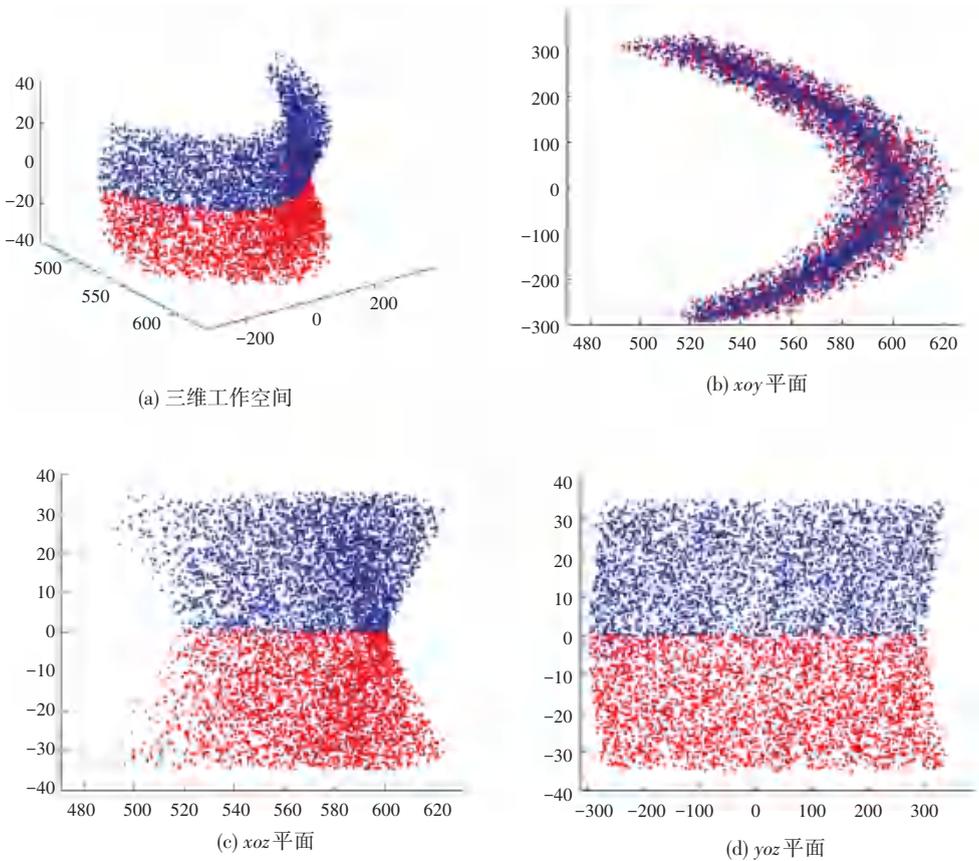


图 6 推拿机器人工作空间
Fig. 6 Massage robot working space

3 推拿力学分析

为了更好地复现医生的推拿手法, 本研究通过压力传感器和角度传感器采集医生手法的推拿数据, 并对相关数据进行处理分析。

3.1 最大推力分析

采集实验一共测试了 100 组患者数据, 因为数据量庞大, 本次实验选择 15 组数据。15 位患者身体除膝关节炎之外无其它影响身体活动的疾病。在对数据进行可行性评判的时候, 需要利用 3σ 原

则^[11-13]保证15组数据没有粗大误差。

先计算出15组数据的算术平均值,并且用其代替真值。医生最大推力见表2。根据表2可得15次重复测量的最大推力平均值为:

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \gamma_i}{15} = 73.45 + 70.21 + 69.92 + \dots + 73.67 + 79.36 + 75.43 = 74.45 \quad (6)$$

其中, $\bar{\gamma}$ 表示最大推力平均值, γ_i 表示第 i 次最大压力值。

求出力均值后,需计算最大压力值的残余误差,结果见表3。基于残差进一步可得标准差:

$$v_i = \gamma_i - \bar{\gamma} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} v_i^2}{n-1}} = \left[\frac{1}{14} \left((-0.99)^2 + (-4.23)^2 + (-4.52)^2 + \dots + (-0.77)^2 + 4.92^2 + 0.99^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 3.10 \quad (8)$$

其中, σ 表示基于残差的标准差; v_i 表示残差; n 表示样本量。

表2 医生最大推力表

Table 2 Doctor's maximum thrust meter N

序号	最大推力	序号	最大推力	序号	最大推力
1	73.45	6	80.23	11	76.72
2	70.21	7	72.07	12	73.96
3	69.92	8	75.65	13	73.67
4	75.84	9	76.48	14	79.36
5	73.39	10	70.38	15	75.43

表3 最大压力值残余误差

Table 3 Residual error of maximum pressure value N

序号	残差	序号	残差	序号	残差
1	-0.99	6	5.79	11	2.28
2	-4.23	7	-2.37	12	-0.48
3	-4.52	8	1.21	13	-0.77
4	1.40	9	2.04	14	4.92
5	-1.05	10	-4.07	15	0.99

从表3中可知,第6组数据残余误差最大。根据 3σ 准则,可求得残余误差:

$$|v_6| = 5.79 < 3.10 \times 3 = 9.30 \quad (9)$$

由此可知,15组最大压力测量的残余误差均满足 3σ 准则,因此根据 3σ 准则可以判定最大压力值

不含有粗大误差,15组数据均有效。

3.2 推力方程拟合

在治疗的过程中患者是先站立后坐下,膝盖运动是一个往复的过程。为了在坐标系中更清楚表达医生大拇指推力的变化,人为规定患者在站立的过程中膝关节角度为“-”,在坐的过程中膝关节角度为“+”。利用膝关节角度的补角进行数据处理,并绘制成散点图如图7所示。医生大拇指推力大小随患者膝关节角度变化均是一个先递增再递减的一个过程。在膝关节角度为 0° 附近,患者直立时,医生大拇指推力达到最大值。

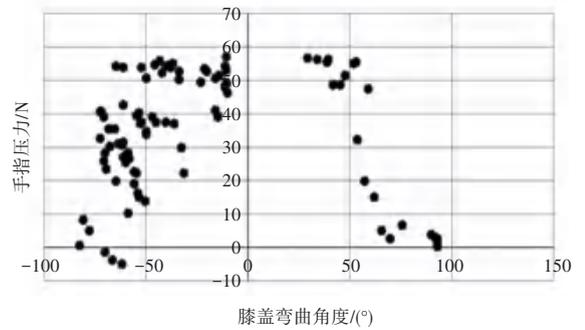


图7 膝关节角度-手指压力散点图

Fig. 7 Knee angle-finger pressure scatter plot

多项式模型是常用的方程拟合模型。线性模型可用范围较窄,要求数据之间存在线性关系。多项式拟合模型适用于数据量大、分布不均匀的数据集,可以模拟一些相当复杂的数据关系。为了更好地研发推拿机器人,需要更直观体现出医生的手法机理。所以将15组散点图放入同一个坐标系中,并通过Origin数据处理软件进行曲线估计。根据点的分布情况选用一元二次型曲线拟合,得到的曲线如图8所示。以患者在接受治疗时膝关节角度为自变量,医生大拇指推力为因变量。得出方程为:

$$y = -0.008x^2 - 0.04278x + 70.06377 \quad (10)$$

据检验, p 为 $0.001 < 0.05$, 因此具有统计学意义。

根据图8,患者膝关节角度的最大值已经超过了 90° 。除了角度传感器自身的误差以外,最重要的原因是在测量时,未能调控好患者的座椅高度,当座椅高度一定的时候,患者的小腿长,膝盖关节初始角度就偏大,反之膝盖弯曲初始角度偏小。后续会改进实验方案,并将传感器的初始值降到最低,提高传感器精度。

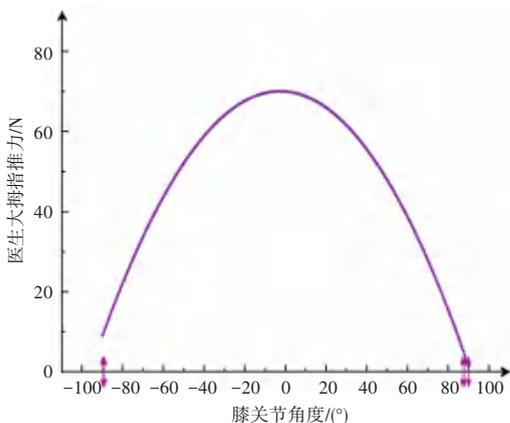


图8 膝关节角度与医生推力函数关系图

Fig. 8 Relationship between knee joint angle and doctor's thrust function

4 推拿机器人样机实验

根据上文对仿生推拿机器人的设计和分析,优化并加工装配其样机。为验证该机器人的可行性,利用样机进行相关实验。本次实验主要分为2部分。一是仿生按摩机器人的行程对比实验。该实验主要是测试结构设计的合理性,是否能够满足绝大部分患者的身材尺寸,同时在行程实验中也会观察各部零件之间运作时的振动和噪音情况,为后续改进设计打下基础;二是进行完整模拟推拿实验,并将样机输出力与推力拟合曲线进行对比,验证实验样机整体的可行性。

4.1 按摩行程对比试验

4.1.1 实验方案

仿生按摩手的行程精度主要由使用的按摩推杆决定,因此行程实验只需要测试按摩推杆能否达到设计要求即可。按摩行程分为3步。第一步是按摩头由零位到总行程的1/3处,并在1/3处从平行于地面的位置向上旋转20°,恢复原位后再向下旋转20°;第二步是由总行程的1/3处运动至总行程的2/3处,与第一步进行同样的旋转操作;第三步行至推杆无法伸出时做第一步中的旋转动作,最后按摩头停止运动,恢复成与地面平行的位置。一共进行15组实验。

为了精确测量出按摩推杆的位置参数,利用Micron Tracker对按摩头前端进行追踪测量。利用绝缘胶带将Micron Tracker探针固定于按摩头前端,通过配套软件可以实时探测到探针的位置信息。实验时将探针尖端轻触仿生按摩手前端,探针的位置会实时显示在PC上。探针坐标实验装置如图9所示。



图9 实验装置图

Fig. 9 Experimental installation drawing

4.1.2 实验数据分析

图10展示了按摩手的三维工作空间情况。将Micron Tracker采集到的空间坐标点经过分析和处理,利用Origin数据处理软件制成三维坐标图。为更直观地看清坐标变化情况,将空间坐标分别投影在XOY平面和YOZ平面上。结合实验方案描述和图表结果可以看出,图中呈线状的是按摩推杆的行程实验坐标,3段弧线是旋转电机带动推杆旋转的三维坐标。按摩推杆的最大行程为50 mm,最大旋转高度为25 mm。图10中按摩推杆理论上应该是直线位移,但是在每次旋转后出现了断层。这是因为旋转电机每次旋转后回归零位的时候存在误差。综上所述,按摩推杆行程和工作空间符合机器人的设计要求。

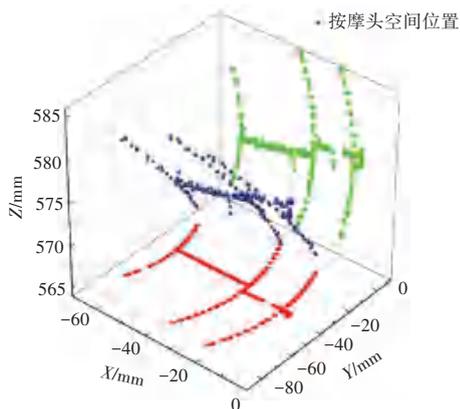


图10 装置工作空间图

Fig. 10 Device workspace diagram

4.2 模拟推拿实验

4.2.1 实验方案

本实验所采用的传感器有压力传感器。测量范围0~150 N,角度传感器、测量范围0~360°。2种压力传感器测量误差为最大量程的5%。实验平台搭建如图11所示,主要设备是压力传感器、角度传感器、采集设备、PC。将压力传感器和角度传感器分别与采集设备相连,采集设备与PC相连,PC端安装有数据采集软件,可实时监测压力和角度的输入。

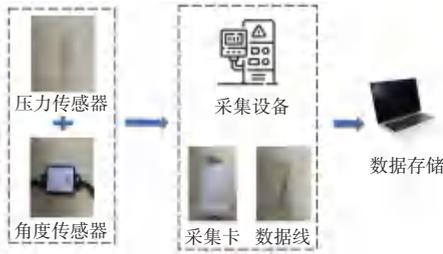


图 11 实验平台
Fig. 11 Experimental platform

实验装置实物如图 12 所示,将膝关节模型固定在座椅上,角度传感器贴于膝盖模型表面,并将压力传感器贴于膝眼处。通过操作推拿机器人控制屏按钮,使其按摩头对准膝关节模型膝眼位置,在膝关节模型发生弯曲时,推力将根据膝关节角度的变化而发生变化,实时数据可显示在 PC 端屏幕上。实验过程中通过手动使膝盖模型弯曲,模拟患者在治疗过程中的站立和坐下动作。

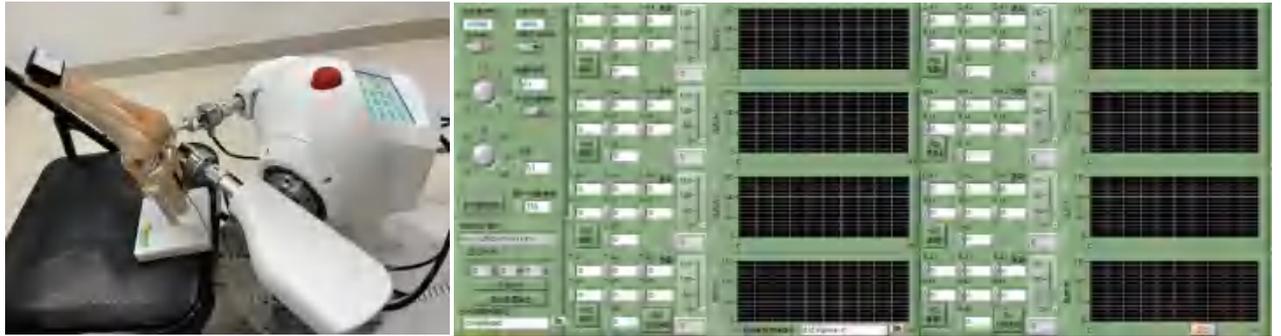


图 12 实验装置
Fig. 12 Experimental apparatus

4.2.2 实验数据分析

利用 Origin 数据处理软件将本次实验采集的数据和拟合的推力输出方程放入同一坐标系中进行分析。样机模拟实验对比曲线如图 13 所示。由图 13 看到,实验推力输出波形和拟合推力方程曲线几乎保持一致,最大压力也近乎相等。但是实验推力输出波形的波峰不是在同一膝关节角度出现。原因主要有 3 点:设备采集时存在一定的延迟;膝盖模型的弯曲是手动进行的,做不到完全匀速,因此存在一定的误差;模型是树脂材料,按摩头接触时会发生相对滑动,同样也会造成这种误差。

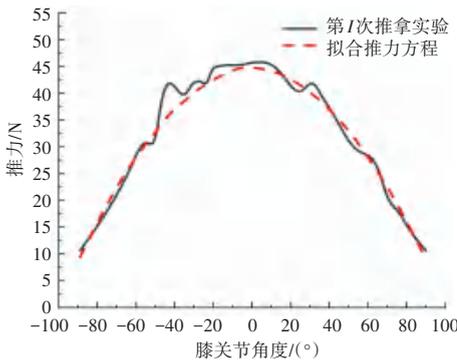


图 13 样机模拟实验对比曲线

Fig. 13 Comparison curve of prototype simulation experiment

5 结束语

本研究设计了一款基于坐位调膝法的仿生推拿机器人,通过实际采集医生的推力数据进行分析处理,更好地实现对医生推拿手法的复现。制作了仿生推拿机器人样机并进行了实验验证,结果表明机器人总体运行稳定,具有良好的运动学特性,验证了整体的可行性,市场应用前景较为广阔。但是该机器人也有一定的局限性,在调整膝盖宽度的时候,本研究采用的是交错放置仿生按摩手,通过伸缩推杆来控制按摩头之间的距离,此方法灵活性差,且零部件尺寸较大、不利于便携。因此,在未来的研制中可以向着更加小巧化、智能化的方向发展,机器人能够便携移动以及自动将按摩手送到膝盖位置,彻底解放医生的双手。

参考文献

[1] 郑连生,李学民,李玉龙. 不同力线位置高位截骨术治疗 KOA 的临床疗效研究[J]. 重庆医学,2022,51(11):1917-1921.
 [2] YANG Ziquan. Research status of knee joint replacement[J]. China Journal of Orthopaedics and Traumatology, 2020, 33(1): 1-3.
 [3] 虞宵,周晓强,余远时,等. 胫骨高位截骨术与单髁置换术治疗膝关节前内侧间室骨关节炎短期疗效及成本效益分析[J]. 中华骨与关节外科杂志,2022,15(3):183-189.
 [4] 陈镜锋,邹道涌,倪锐聪,等. 筋病理理论指导下中医综合疗法治

- 疗膝关节关节炎 100 例效果观察[J]. 中外医学研究, 2018, 16(34):129-130.
- [5] 马邦峰,王殊轶,龚利,等. 基于坐位调膝法的仿生推拿装置研究[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(2): 150-154.
- [6] 尹小琴,许永根,马履中,等. 中医推拿机器人末端执行器结构优选与运动学分析[J]. 中国机械工程, 2010, 21(24): 2899-2903.
- [7] 彭金婵,陆春辰,李彦博,等. 仿生柔性按摩机器人的设计与实现[J]. 中国民间疗法, 2022, 30(24):146-149.
- [8] ZHANG A. EMMA the robot masseuse gets to work in Singapore (Update) [EB/OL]. [2017-10-12]. <https://medicalxpress.com/news/2017-10-robot-masseuse.html>.
- [9] WANG Zhen, CHANG Jian, LI Bin, et al. Kinematics solution of snake-like manipulator based on improved backbone mode method [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 1774-1779.
- [10] PATWATWARDHAN A, PRAKASH A, CHITTAWADIGI R G. Kinematic analysis and development of simulation software for Nex Dexter robotic manipulator [J]. Procedia Computer Science, 2018, 133:660-667.
- [11] WANG Fei, QIAN Zhiqin, YAN Zhiguang, et al. A novel resilient robot: Kinematic analysis and experimentation[J]. IEEE Access, 2019, 8: 2885-2892.
- [12] KANG D H, KWON D S. An ergonomic comfort workspace analysis of master manipulator for robotic laparoscopic surgery with motion scaled teleoperation system[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery: MRCAS, 2022, 18(6):e2448.
- [13] 周律,周显明,汪亮,等. 基于蒙特卡罗方法的双臂机器人工作空间分析[J]. 机械传动, 2014, 38(6):85-87.
- [14] 王智杰,杜宇凡,杨沫,等. 基于MATLAB Robotics Toolbox的Dobot机械臂运动规划[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(2): 49-51.
- [15] 郭肖亭,王文廉,葛双超,等. 误差理论在科技论文数据处理与分析中的应用[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(3): 100-101.