·康复工程·

一种生物融合式踝关节康复机器人的设计*

边 辉[1] 汪 琦[2] 刘 晓[1] 赵铁石[1]

摘要

目的:设计一种康复机器人用于损伤踝关节的运动康复治疗。

方法:基于对踝关节生理结构的分析,结合机构学理论知识将其等效为球面副,应用生物融合式康复机构设计理念得到包含弹性转动副的人机闭环机构; 应用球面几何、影响系数法对该机构进行康复运动分析,并综合考虑安全、卫生、患者康复体位等因素完成踝关节康复机器人样机设计。

结果:本研究所设计的康复机器人在运动过程当中,可以通过对机械驱动量的改变实现踝关节一定姿态下输出作用力的调整。同时,还可以在机械驱动量不变的条件下通过对踝关节主动作用力的改变实现其位姿的调整;实验验证该康复机器人样机在电机驱动下可实现踝关节典型康复运动,能够满足踝关节康复治疗对机器人运动形式的要求。

结论:基于生物融合式康复机构所研制机器人在完成踝关节基本康复运动的同时,可以充分发挥患者能动性从而实现更好的康复治疗效果。

关键词 踝关节;生物融合;康复机器人;运动分析;设计

中图分类号:R496 **文献标识码**:B **文章编号**:1001-1242(2013)-07-0650-05

踝关节扭伤是骨科临床常见的运动伤,其发生率在下肢损伤中居第二位。一方面由于踝关节相对灵活的生理结构,另一方面由于踝关节在奔跑、跳跃和身体负重时承受了巨大的载荷和冲击,综合导致踝关节扭伤在日常生活中较为常见。踝关节扭伤的治疗除了及时采取冷敷和药物治疗外,还需要在关节肿胀消退、疼痛减轻后,积极地进行康复训练,防止关节粘连的同时加速关节组织的愈合,增强踝关节周围韧带肌肉力量,提高踝关节的柔韧性、稳定性及协调性,预防踝关节反复扭伤或功能障碍等后遗症的产生[1—3]。随着运动康复理论及机器人技术的发展,出现多种踝关节康复机器人辅助治疗师为患者进行踝关节的运动康复治疗。康复机器人运动平稳可控,不仅可以保证训练的效率和强度,而且能够在康复过程中对各种数据进行实时记录用于治疗效果的评价及治疗方案的修正,其使用改进了传统的康复治疗手段并提高康复治疗的效果和效率[4—9]。

目前出现的多种踝关节康复机器人虽然各具特色且一定程度上提高了踝关节康复治疗的效率和效果[10—16],但也存在着一些不足:①因机构自由度不足,机器人只能实现踝关节个别运动的康复治疗;②虽然具有3个转动自由度可以带动踝关节进行外翻/内翻、背屈/跖屈、外展/内收及其复合运动,但由于转动中心位于机械机构内部、空间上不能够与踝关节中心重合,使得康复运动过程中踝关节的位置不断改变而导致康复角度不准确;③由于不具有移动自由度而不能结合康复需求对踝关节进行牵引治疗;④踝关节的运动完全由机械确定,人体不能从机构层面影响康复运动,安全性差。针对上述问题,本文提出一种生物融合式踝关节康复机器人。这是一种以机械力学与生物生理运动学相结合的设计,它不仅可以实现脚掌围绕踝关节中心的复合康复运动以及对踝关节的牵引治疗,且由于人体可以从机构层面对机器人运动进行调节,使其具有较高的安全性。

1 踝关节及其机构学等效

踝关节又叫距骨小腿关节,是由小腿的胫骨和腓骨远程关节面与距骨滑车构成的复关节,具体结构如图1所示。踝关节的解剖结构决定其可实现绕3个互相垂直轴的转动运动,即人足的内翻/外翻、背屈/跖屈运动和内收/外展运动。

考虑到人体中骨骼和关节与机构学中的构件和运动副的相似性,从工程学角度,对人体进行机构学等效建模。跖骨形状不规则使得踝关节3条运动轴线不是交与一点而是在一个空间球内,考虑到康复运动过程中人体在一定空间内

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2013.07.014

*基金项目:河北省科技计划项目(11215636);秦皇岛市科技支撑计划项目(2012021A077)

1 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室、先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室(燕山大学),秦皇岛河北大街西段438号,066004; 2 秦皇岛市骨科医院

作者简介:边辉,男,博士,讲师; 收稿日期:2013-03-14

图1 踝关节结构图

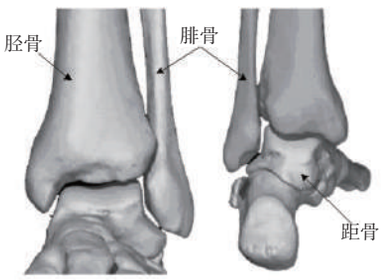
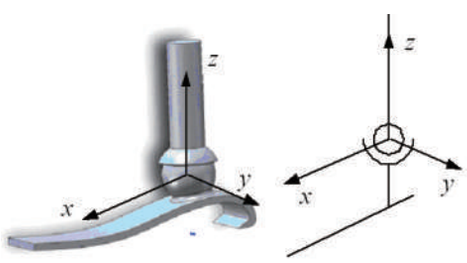


图2 踝关节机构学模型



的微量调整,将踝关节等效为球面副,如图2所示,在踝关节中心建立坐标系,x轴沿脚掌方向,z轴沿小腿方向,分别为内翻/外翻和内收/外展运动转轴。

2 生物融合式踝关节康复机器人设计

生物融合式康复机构指的是一类由人体和机械共同组成的康复机器人机构[17—18],其特点在于机构是包含弹性储能运动副的人机闭环,其任意确定运动的实现需要机械与人体的共同作用。也就是说,生物融合式康复机构中,人体从机构层面参与到机械的控制,不同于一般康复机器人控制层面的柔性化[19—20],这样的结构可以更好发挥人体的主观能动性,一方面提高患者参与治疗的积极性,另外降低患者产生二次损伤的危险。本文所提生物融合式踝关节康复机器人就是基于这一机构类型设计的,其模型及其机构简图如图3—4所示,其中人体部分包括小腿以及通过踝关节连接的脚掌,机械部分包括机架、牵引机构、并联球面机构。当患者采用坐姿进行康复训练过程中,人体小腿通过设在膝关节下方的牵引机构与机架连接,脚掌通过并联球面机构与机架连接,人机共同构成闭环机构,考虑到运动治疗的舒适性,小腿和地面呈一定角度布置。

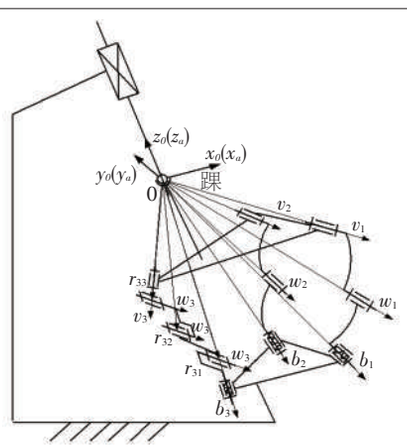
并联机构为具有远程转动中心[21—22]的2-$\underline{R}_N$(Re)R_NR_N/$\underline{R}_N$(Re)$^bR^bR^bRR_N$机构,其中,R和Re分别表示转动副和弹性储能转动副,下角标N表示转动副轴线交与一点,上角标b表示转动副轴线平行,下划线表示该运动副为驱动。该机构能够实现绕转动中心的3自由度回转运动,其转动中心位于机械机构外部,能够与踝关节中心重合,确保康复运动过程中踝关节空间位置始终保持不变。机械机构带动脚掌围绕踝关节转动,其输出转角即为踝关节康复角度,可有效提高康复运动的精度和安全性。并联机构驱动轴上设置转角由踝关节作用力矩确定的弹性储能转动副,则其驱动角为安装在并联机构定平台的电机输入角和弹性储能转动副转角构成的合成输入角,其中电机和弹性副输入量分别称为机械驱动和人体驱动。牵引机构由沿小腿方向的单自由度移动副构成,可以实现对踝关节的牵引治疗,以提高运动康复治疗效果。在膝关节处设置支撑,一方面减小人体下肢重力对受伤踝关节的影响,另一方面方便沿小腿方向牵引力的施加,防止直接在小腿上施加牵引力时对人体皮肤的摩擦和挤压。

对康复机器人来说,安全性是评价其优劣的一个重要指标,本文所述康复机器人采用下述方法以确保患者安全:电路中设制限位开关、急停过载保护等确保机器人在意外情况下瞬间切断供电实现制动;小腿在重力作用下通过膝关节处的支撑实现自然固定,且用于固定脚掌的康复鞋通过粘扣与机械连接,这样的固定方式可以保证人体在危险发生时及时同机械分离;电机驱动轴上设置力矩限制机构,当驱动力矩

图3 康复机器人模型



图4 康复机器人机构简图



过大时，电机将空转从而保证人体不会因受力过大而损伤。

3 人体作用下的康复运动

不同于传统康复机器人通过采集人机作用力经柔顺控制以提高康复过程中人体的安全性，生物融合式康复机器人充分发挥患者的能动性，可不经过控制系统直接对康复运动轨迹进行调整从而提高其安全性。建立图4所示坐标系，初始时并联机构动平台和定平台相互平行，位于踝关节中心的定坐标系$\{o\text{-}x_o y_o z_o\}$与动坐标系$\{a\text{-}x_a y_a z_a\}$重合，应用球面几何知识[23—24]，通过对轴线交与一点的转动副的方向矢量的相互转换，可得踝关节康复转角与机构驱动轴合成输入角间的映射关系：

$$(\alpha\ \beta\ \gamma)=f(q_1\ q_2\ q_3) \tag{1}$$

其中，α、β、γ分别为踝关节外翻/内翻、背屈/跖屈、外展/内收运动的康复转角，也是动系的$z\text{-}y\text{-}x$欧拉角。q_i(i=1,2,3)为三个驱动轴的合成输入角，且有$q_i=\theta_i+\theta_i'$，θ_i为机械驱动量，θ_i'为人体驱动量。由于人体驱动量与康复过程中人体的作用力相关，则需要结合机构的受力对其进行计算。人机闭环机构没有外负载且人体重力大部分被膝关节处支撑力平衡，而球面机构所受外力对其驱动无影响，仅考虑踝关节关节力矩情况下建立并联机构力矩平衡方程：

$$\tau=[G^H_q]^T_{3\times3}M \tag{2}$$

其中，$\tau=(\tau_1\tau_2\tau_3)^T$为并联机构各分支驱动轴力矩矢量，$[G^H_q]^T$为机构一阶影响系数矩阵[25—26]，$M$为踝关节处人体作用力矩矢量。设人体驱动刚度分别为$k_i$，可得机械驱动量为

$$\theta_i=q_i-\tau_i/k_i \tag{3}$$

依据踝关节康复转角及力矩，应用式(1)–式(3)可以对康复运动进行轨迹规划。

康复运动过程中，若踝关节作用力矩突然改变，此时踝关节的康复转角可结合机械驱动量应用上述公式采用循环逼近的方法进行计算。

依据图3所示康复机器人模型中各结构参数且设弹性储能转动副刚度k_i=5Nm/rad，若在初始位置踝关节力矩按照式(4)规律变化：

$$\begin{cases}M_\alpha=8\sin(\pi t/4)\\ M_\beta=-6\sin(\pi t/4)\\ M_\gamma=4\sin(\pi t/4)\end{cases} \tag{4}$$

要保证康复运动过程中踝关节的康复转角不变，机械驱动量随踝关节作用力矩变化关系如图5所示。由图可知，对于该生物融合式康复机构，人体作用力和机械驱动量密切相关，踝关节被动康复运动过程中，可以通过机械驱动的位置控制实现踝关节康复转角和力矩的双重控制。

要保证康复运动过程中机械驱动量不变，踝关节康复角随踝关节作用力矩变化关系如图6所示。由图可知，踝关节康复转角会随着人体作用力的改变会进行调整，当采用主动康复运动时，即便机械驱动没有输入，患者也可发挥其自身能动性进行小范围内的运动；当采用被动康复运动时，患者在感觉不适的情况下，可以通过对康复转角的调整实现对自身的保护。

图5 机械驱动量随踝关节作用力矩变化曲线

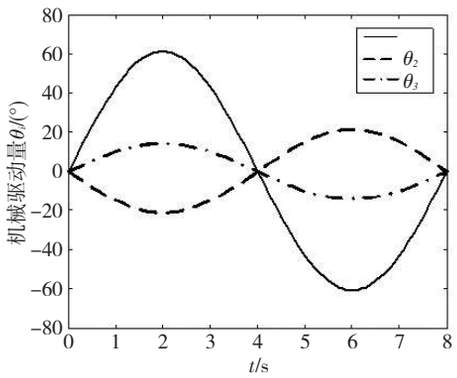
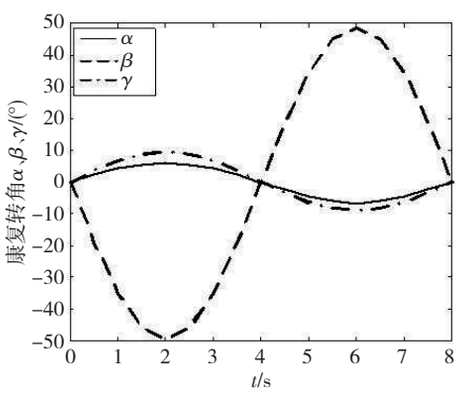


图6 康复转角随踝关节作用力矩变化曲线



4 机器人样机及其康复运动

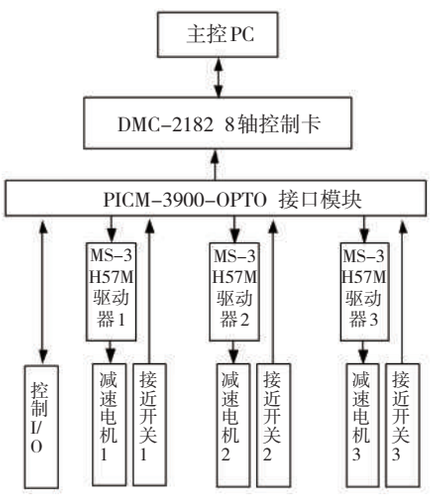
由于康复机器人通常是在医院、诊所等环境中使用，样机采用美观轻便且不会生锈的铝合金作为其主要材料；为防止转动轴承在添注润滑油过程中对环境造成污染，回转部件采用滑动轴承；选用电感式接近开关作为限位开关以防止传统机械限位开关因碰撞造成的误操作。考虑到并联机构运动具有强耦合特性，其电控系统采用PC机结合多轴运动控制卡的形式，应用凸轮功能实现对踝关节康复运动的精确控制。机器人样机及其控制系统分别如图7—8所示。

基于上述康复运动分析，应用该康复机器人对健康人体踝关节进行连续被动运动训练，图9所示为典型康复运动过程中踝关节姿态。实验证明该康复机器人可以带动人足进行内翻/外翻、背屈/跖屈运动和内收/外展运动，且运动过程

图7 踝关节康复机器人样机



图8 机器人电控系统简图

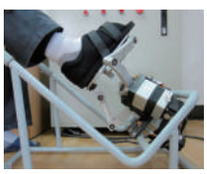


中踝关节中心位置保持不变;使用该康复机器人进行康复训练,能够模拟康复医师一手把持脚踝、一手把持脚掌的康复运动形式,即踝关节中心位置不变,人足围绕踝关节中心运动。

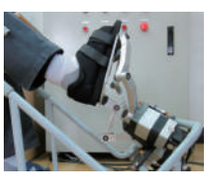
5 结论

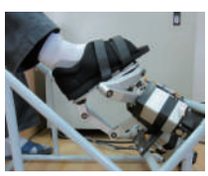
本文将人体踝关节等效为球面副,应用生物融合式康复机构设计理念,完成踝关节康复机器人机构设计。其康复运动分析结果充分体现了生物融合式康复机构中人体的能动性,综合考虑安全、舒适、卫生等因素研制了康复机器人样机并进行初期实验,实验结果证明该康复机器人能够带动踝关节进行康复训练,满足踝关节康复治疗对机器人运动形式的要求。在今后的工作中将进一步完善机器人控制软件,采用该康复机器人对损伤踝关节开展临床实验,通过数据检验该康复机器人的康复治疗效果。

图9 踝关节典型康复运动


(a)初始位侧视图


(b)初始位俯视图


(c)背屈


(d)跖屈


(e)内翻


(f)外翻


(g)内旋


(h)外旋

参考文献

[1] 姚太顺,孟宪杰.踝关节外科[M]. 北京:中国中医药出版社,1998.2—30.
[2] 丰健民,李成永.踝关节扭伤的治疗[J].第二军医大学学报,1997, 2: 25—28.
[3] 王雪强,俞卓伟,刘静,等.老年人两侧踝关节本体感觉及其与肌力的相关性研究[J].中国康复医学杂志,2011,26(7):623—626.
[4] 张娇娇,胡秀枋,徐秀林.下肢康复训练机器人研究进展[J].中国康复理论与实践,2012, 18(8): 728—730.
[5] 陈鸥,刘启栋,王人成,等.一种减重步行训练机器人的研制[J].中国康复医学杂志, 2011, 26(9): 847—851.
[6] 孙海涛,李启光,刘向权,等.肢体康复机器人的主被动模式设计研究[J].制造业自动化, 2012, 34(4): 69—72
[7] 方涛涛,韩建海,王会良,等.新型卧式下肢康复训练机器人机械系统设计[J].中国康复医学杂志,2013,(3):246—250.
[8] 张立勋,李长胜,刘富强.多模式下肢康复训练机器人的设计与实验分析[J].中国康复医学杂志,2011,26(5):464—466.
[9] Shi XH, Wang HB, Yuan L, et al. Design and Analysis of a Lower Limb Rehabilitation Robot[J]. Advanced Materials Research, 2012, 490: 2236—2240.
[10] Zhou P, Zhang SD, Wang Q. Design and analysis of a mechanism of ankle rehabilitation robot[J]. Advanced Materials Research, 2013, 655: 1038—1042.
[11] 段学习,王蕴岭,汪琦.踝关节康复受力测量装置研究[J].河北科技大学学报, 2011, 32(5): 460—465.
[12] 赵铁石,于海波,戴建生.一种基于3-RSS/S并联机构的踝关节康复机器人[J].燕山大学学报, 2005, 29(6): 471—475.
[13] Yoon Jungwon, Ryu Jeha, Lim Kil-Byung. Reconfigurable ankle rehabilitation robot for various exercises[J]. Journal

of Robotic Systems, 2006, 22: 15—33.
[14] Lin Chou-Ching K, Ju Ming-Shaung, Chen Shu-Min. A specialized robot for ankle rehabilitation and evaluation[J]. Journal of Medical and Biological Engineering, 2008, 28 (2): 79—86.
[15] Zhang YN, Wu YQ, Shen LY,et al. Analysis of ankle trajectory parameters of rehabilitation training on level walking [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 303—306: 1736—1740.
[16] 刘更谦,高金莲,杨四新.踝关节康复训练并联机构构型及运动学分析[J].机电产品开发与创新, 2005, 18(5):13—15.
[17] 边辉,赵铁石,田行斌,等.生物融合式康复机构及其应用[J].机器人,2010, 32(4):470—477.
[18] 边辉.生物融合式康复机构理论及应用研究[D].秦皇岛:燕山大学, 2011.
[19] Kang Y, Jeon D. Rehabilitation robot control using the VSD method[C],2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2012: 192—197.
[20] 孙睿,宋嵘,汤启宇.肌电控制康复机器人协助的脑卒中患者肘关节康复训练的多参数评价[J].中国康复医学杂志,2012,27(9): 802—807
[21] 宗光华,裴旭,于靖军,等. 双平行四杆型远程运动中心机构的设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43: 103—107.
[22] 刘艳辉.具有远程转动中心的踝关节康复机器人分析与设计[D].燕山大学,2011.35—43.
[23] 边辉,刘艳辉,梁志成,等.并联2-RRR/UPRR踝关节康复机器人机构及其运动学[J].机器人, 2010, 32(1):6—12.
[24] 孙培先.球面图学与空间角度计算[M].山东:石油大学出版社, 1991.21—40.
[25] 黄真.空间机构学[M].北京:机械工业出版社, 1991. 75—83.
[26] 尹小琴,马履中.基于影响系数的并联机器人机构运动分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2002,23(4):43—46.

“中山大学研究生院2013年康复医学与理疗学专业研究生课程班”招生通知

为了培养适应我国康复医学发展和临床服务所需的高级专门人才，经广东省学位办批准，中山大学研究生院决定二０一三年在广州举办康复医学与理疗学专业研究生课程进修班。主办方将通过国际物理医学与康复医学会国际交流委员会的交流平台和中山大学研究生培养示范基地，开展康复医学临床进修生、研究生和住院医师三合一逐步合并的培训，提高本专业人才素质，满足国内康复医疗服务迅速发展的需求。

招生对象一般为大学临床医学专业本科毕业者；招生人数30名。学习年限二年。凡完成全部课程学习考试成绩合格、修满规定学分者，颁发统一的《研究生课程进修班结业证书》。符合国家有关在职人员以同等学力申请硕士学位条件者，可以向中山大学申请硕士学位。

详情请查询中山大学研究生院网址 http://graduate.sysu.edu.cn 或 http://graduate.sysu.edu.cn/Item/4391.aspx

联系方式：中山大学附属第一医院康复医学科，广州市越秀区中山二路58号（510080）；电话：020 28823388转8536 或8519；联系人：毛玉瑢、冷雁。

中山大学附属第一医院

第十届全国骨科及运动创伤康复学习班通知

北京大学第三医院康复医学科，北京康复医学会骨科分会联合主办骨科康复系列学习班，本届学习班内容为脊柱脊髓伤病康复，2013年9月13—17日在北京举行。学习班内容为：脊柱脊髓解剖；脊柱脊髓康复进展；常见脊柱疾病及脊柱脊髓外伤手术治疗介绍；脊柱脊髓影像学诊断；颈椎疾病康复评定与治疗；腰椎疾病康复评定与治疗； 脊髓损伤并发症及康复治疗；最新版脊髓损伤神经学分类国际标准及脊髓损伤后残存自主神经功能载录国际标准解读及使用培训。采取理论与实际相结合，临床与康复相结合，医师与治疗师相结合授课方式。使学员既掌握相关骨科康复的理论，又能实际操作。适合骨科、康复科医师、康复治疗师参加。参加者获得国家级继续教育I类学分10分，2013-16-00-046(国)。

联系人：北京大学第三医院康复医学科：张娟。邮编:100191。固定电话：010-82264595。移动电话：15611908376。传真：010-82265861。E-mail: bysykf@163.com。截止日期2013年9月6日。为保证学习效果限额80人，以报名先后为序。

北京大学第三医院康复医学科
北京康复医学会骨科分会