



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116869782 A

(43) 申请公布日 2023.10.13

(21) 申请号 202311014031.8

(22) 申请日 2023.08.14

(71) 申请人 河北工业大学

地址 300130 天津市红桥区丁字沽光荣道8号河北工业大学东院

(72) 发明人 刘承磊 高德义 张建军 魏俊 郭士杰

(74) 专利代理机构 天津翰林知识产权代理事务所(普通合伙) 12210

专利代理师 蔡运红

(51) Int. Cl.

A61H 1/02 (2006.01)

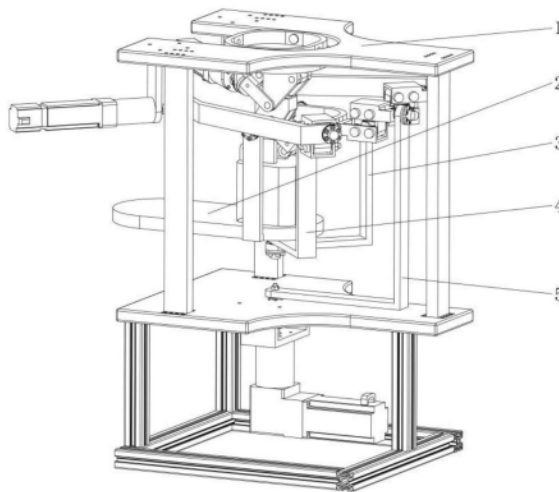
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种刚柔耦合踝关节康复机器人

(57) 摘要

本发明为一种刚柔耦合踝关节康复机器人,包括定平台、动平台、第一支链、第二支链和第三支链;三条支链均与定平台和动平台连接,第一支链和第二支链的结构相同且对称分布在第三支链两侧;每支链均包括一个刚柔耦合模块,刚柔耦合模块包括四个连杆和扭簧;四个连杆依次转动连接组成平行四边形,相邻两个连杆的连接处安装一个扭簧;三条支链的驱动电机控制动平台姿态,实现踝关节的背/趾屈、内/外翻以及内/外旋,三条支链的刚柔耦合模块通过扭簧调节动球心的位置,使动球心在以距骨长度为半径的球面上移动,以拟合人体距下关节的位置,实现胫距关节与距下关节之间的运动耦合,使得该机器人能够顺应不同患者的不同康复轨迹,提高踝关节康复效率,降低二次损伤。



1. 一种刚柔耦合踝关节康复机器人,包括定平台、动平台、第一支链、第二支链和第三支链;三条支链均与定平台和动平台连接,第一支链和第二支链的结构相同且对称分布在第三支链两侧;其特征在于,

所述第一支链包括第一支链驱动电机、第一支链第一连杆、第一支链刚柔耦合模块和第一支链第二连杆;第一支链驱动电机与定平台连接,第一支链第一连杆一端与第一支链驱动电机的输出轴连接,第一支链第一连杆另一端与第一支链刚柔耦合模块转动连接,第一支链刚柔耦合模块同时与第一支链第二连杆一端转动连接,第一支链第二连杆另一端与动平台中后部转动连接;

所述第三支链包括第三支链驱动电机、第三支链第一连杆、第三支链刚柔耦合模块、第三支链第二连杆和第三支链第三连杆;第三支链驱动电机位于定平台下部,第三支链驱动电机的输出轴与第三支链第一连杆一端连接,第三支链第一连杆另一端与第三支链刚柔耦合模块转动连接,第三支链刚柔耦合模块同时与第三支链第二连杆一端转动连接,第三支链第二连杆另一端的两侧分别与第三支链第三连杆上端的两侧转动连接,第三支链第三连杆的下端与动平台中后部固定连接;

第一支链刚柔耦合模块与第三支链刚柔耦合模块的结构相同,均包括四个连杆和扭簧;四个连杆依次转动连接组成平行四边形,相邻两个连杆的连接处安装一个扭簧;

该康复机器人具有一个定球心和动球心,三条支链的驱动电机控制动平台姿态,实现踝关节的背/趾屈、内/外翻以及内/外旋,三条支链的刚柔耦合模块通过扭簧调节动球心的位置,使动球心在以距骨长度为半径的球面上移动,以拟合人体距下关节的位置。

2. 根据权利要求1所述的刚柔耦合踝关节康复机器人,其特征在于,所述康复机器人的距骨姿态参数 (α_T/β_T) 与足部姿态参数 $(\alpha/\beta/\gamma)$ 的映射关系如式(19)所示,根据映射关系得到康复机器人结构参数 $(\varphi_1/\varphi_2/\varphi_3/\varphi_4/\varphi_5/\varphi_6/\varphi_7)$,实现结构优化;

$$\begin{cases} \alpha_T = g_\alpha(\alpha, \beta, \gamma, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7) \\ \beta_T = g_\beta(\alpha, \beta, \gamma, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7) \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \alpha_T = \sin^{-1} \left(\frac{B_2 \sqrt{B_4 - 2c_{\varphi_7}^2} - b_{12} + b_{22} c_{\varphi_7}}{\mp B_4 \sqrt{2 - B_4} - B_4 c_{\varphi_7}} \right) \\ \beta_T = \tan^{-1} \left(\frac{\mp B_1 + \frac{(b_{11} + b_{21}) \sqrt{2 - B_4}}{\sqrt{B_4 - 2c_{\varphi_7}^2}} c_{\varphi_7}}{\pm B_3 + \frac{(b_{23} + b_{13}) \sqrt{2 - B_4}}{\sqrt{B_4 - 2c_{\varphi_7}^2}} c_{\varphi_7}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} B_1 = b_{12} b_{23} - b_{13} b_{22} \\ B_2 = b_{11} b_{23} - b_{21} b_{13} \\ B_3 = b_{12} b_{21} - b_{11} b_{22} \\ B_4 = b_{12} b_{22} + b_{13} b_{23} + b_{11} b_{21} + 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta_T \cos \alpha_T \\ -\sin \alpha_T \\ \cos \beta_T \cos \alpha_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\varphi_7} \\ c_{\varphi_7} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中： $g_\alpha(\cdot)$ 、 $g_\beta(\cdot)$ 为映射函数， α_T 和 β_T 为距骨绕定坐标系x、y轴的转角， α 、 β 和 γ 为足部绕定坐标系x、y和z轴的转角， $(b_{11}, b_{12}, b_{13})^T$ 为轴线 O_1B_{U1} 在定坐标系中的单位向量 b_1 ， $(b_{21}, b_{22}, b_{23})^T$ 为轴线 O_1B_{U2} 在定坐标系中的单位向量 b_2 ， φ_1 为轴线 O_1A_1 在定坐标系中的单位向量 a_1 与定坐标系x轴的夹角， φ_2 为单位向量 a_1 在定坐标系面yoz上的投影与定坐标系z轴的夹角， φ_3 为轴线 O_2C_1 在定坐标系中的单位向量 c_1 与动坐标系x轴的夹角， φ_4 为单位向量 c_1 在动坐标系面yoz上的投影与动坐标系x轴的夹角， φ_5 和 φ_6 分别为单位向量 b_i 与轴线 O_1A_i 和 O_2C_i 的夹角， φ_7 为双心线 O_1O_2 与单位向量 b_1 或 b_2 的夹角， O_1 为康复机器人的定球心， O_2 为康复机器人的动球心， b_i 为轴线 O_1B_{Ui} 在定坐标系中的单位向量， B_{Ui} 为第i条第一连杆与第一支链刚柔耦合模块的转动中心， A_i 为第i条支链驱动电机与第一连杆的转动中心， C_i 为第i条支链第二连杆与动平台的转动中心， c_{φ_7} 为夹角 φ_7 的余弦值；定坐标系的原点位于康复机器人定球心，z轴垂直于动平台向下，y轴与第三支链第一连杆和第三支链刚柔耦合模块的转动轴线重合，x轴服从右手定则；动坐标系的原点位于康复机器人的动球心，z轴垂直于动平台向下，x轴与第三支链第三连杆上端右侧和第三支链第二连杆另一端右侧的转动轴线重合，y轴服从右手定则。

3. 根据权利要求2所述的刚柔耦合踝关节康复机器人，其特征在于，所述单位向量 b_i 满足下述方程：

$$\begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} \\ c_{i1} & c_{i2} & c_{i3} \end{bmatrix} [b_{i1} \quad b_{i2} \quad b_{i3}]^T = \begin{bmatrix} c_{\varphi_5} \\ c_{\varphi_6} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}) 为轴线 O_1A_i 在定坐标系中的单位向量坐标， $(b_{i1}, b_{i2}, b_{i3})^T$ 为单位向量 b_i 的坐标， (c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}) 为轴线 O_2C_i 在定坐标系中的单位向量坐标， c_{φ_5} 为夹角 φ_5 的余弦值， c_{φ_6} 为夹角 φ_6 的余弦值。

4. 根据权利要求1所述的刚柔耦合踝关节康复机器人，其特征在于，所述第一支链第一连杆两端的转动轴线、第二支链第一连杆两端的转动轴线、第三支链第一连杆与第三支链刚柔耦合模块的转动轴线交于康复机器人的定球心；第一支链第二连杆两端的转动轴线、第二支链第二连杆两端的转动轴线、第三支链第二连杆两端和第三支链第三连杆的转动轴线以及第三支链第三连杆与动平台连接孔的轴线交于康复机器人的动球心。

一种刚柔耦合踝关节康复机器人

技术领域

[0001] 本发明属于踝关节康复器械技术领域,具体涉及一种刚柔耦合踝关节康复机器人。

背景技术

[0002] 踝关节是人体的重要关节,作为人体负重最大的关节,踝关节易发生损伤,如行走时踏入凹坑使踝关节突然内翻、内收,即可损伤外侧副韧带,严重者可使踝关节骨折。奔跑、跳跃和进行体育运动时,踝关节承受了巨大的载荷和冲击,也容易损伤。

[0003] 随着机器人技术的不断发展,踝关节康复机器人层出不穷,为了达到康复训练的目的,踝关节康复机器人的构型和参数设计需要参考真实的骨结构,常见的踝关节拟合模型包括RR模型、S模型和SS模型等,SS模型结合了RR模型与S模型的特点与优势,将胫距关节和距下关节均等效为运动适应能力更强的S型关节,故具有更高的匹配度和精度。

[0004] 尽管不同患者的骨结构基本相似,运动方式也大致相同,但是不同患者的组织韧带结构差异较大,导致了胫距关节和距下关节的运动耦合关系不同,所以不同患者的康复轨迹也不尽相同。为了取得良好的康复训练效果,避免二次损伤,要求踝关节康复机器人的运动能够顺应不同患者的康复轨迹,而现有的纯刚性踝关节康复机器人则无法满足此要求。

[0005] 为此,本发明提出一种刚柔耦合踝关节康复机器人,不仅能实现踝关节的背/趾屈、内/外翻以及内/外旋,还能够拟合距上关节和距下关节之间的耦合运动,使康复机器人能够顺应不同患者的康复轨迹。

发明内容

[0006] 针对现有技术的不足,本发明拟解决的技术问题是,提供一种刚柔耦合踝关节康复机器人。

[0007] 本发明解决其技术问题所采用如下的技术方案:

[0008] 一种刚柔耦合踝关节康复机器人,包括定平台、动平台、第一支链、第二支链和第三支链;三条支链均与定平台和动平台连接,第一支链和第二支链的结构相同且对称分布在第三支链两侧;其特征在于,

[0009] 所述第一支链包括第一支链驱动电机、第一支链第一连杆、第一支链刚柔耦合模块和第一支链第二连杆;第一支链驱动电机与定平台连接,第一支链第一连杆一端与第一支链驱动电机的输出轴连接,第一支链第一连杆另一端与第一支链刚柔耦合模块转动连接,第一支链刚柔耦合模块同时与第一支链第二连杆一端转动连接,第一支链第二连杆另一端与动平台中后部转动连接;

[0010] 所述第三支链包括第三支链驱动电机、第三支链第一连杆、第三支链刚柔耦合模块、第三支链第二连杆和第三支链第三连杆;第三支链驱动电机位于定平台下部,第三支链驱动电机的输出轴与第三支链第一连杆一端连接,第三支链第一连杆另一端与第三支链刚

柔耦合模块转动连接,第三支链刚柔耦合模块同时与第三支链第二连杆一端转动连接,第三支链第二连杆另一端的两侧分别与第三支链第三连杆上端的两侧转动连接,第三支链第三连杆的下端与动平台中后部固定连接;

[0011] 第一支链刚柔耦合模块与第三支链刚柔耦合模块的结构相同,均包括四个连杆和扭簧;四个连杆依次转动连接组成平行四边形,相邻两个连杆的连接处安装一个扭簧;

[0012] 该康复机器人具有一个定球心和动球心,三条支链的驱动电机控制动平台姿态,实现踝关节的背/趾屈、内/外翻以及内/外旋,三条支链的刚柔耦合模块通过扭簧调节动球心的位置,使动球心在以距骨长度为半径的球面上移动,以拟合人体距下关节的位置。

[0013] 进一步的,所述康复机器人的距骨姿态参数 (α_T/β_T) 与足部姿态参数 $(\alpha/\beta/\gamma)$ 的映射关系如式(19)所示,根据映射关系得到康复机器人结构参数 $(\varphi_1/\varphi_2/\varphi_3/\varphi_4/\varphi_5/\varphi_6/\varphi_7)$,实现结构优化;

$$[0014] \quad \begin{cases} \alpha_T = g_\alpha(\alpha, \beta, \gamma, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7) \\ \beta_T = g_\beta(\alpha, \beta, \gamma, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7) \end{cases} \quad (19)$$

$$[0015] \quad \begin{cases} \alpha_T = \sin^{-1} \left(\frac{B_2 \sqrt{B_4 - 2c_{\varphi_7}^2} - b_{12} + b_{22} c_{\varphi_7}}{\mp B_4 \sqrt{2 - B_4}} \right) \\ \beta_T = \tan^{-1} \left(\frac{\mp B_1 + \frac{(b_{11} + b_{21}) \sqrt{2 - B_4}}{\sqrt{B_4 - 2c_{\varphi_7}^2}} c_{\varphi_7}}{\pm B_3 + \frac{(b_{23} + b_{13}) \sqrt{2 - B_4}}{\sqrt{B_4 - 2c_{\varphi_7}^2}} c_{\varphi_7}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

$$[0016] \quad \begin{cases} B_1 = b_{12} b_{23} - b_{13} b_{22} \\ B_2 = b_{11} b_{23} - b_{21} b_{13} \\ B_3 = b_{12} b_{21} - b_{11} b_{22} \\ B_4 = b_{12} b_{22} + b_{13} b_{23} + b_{11} b_{21} + 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$[0017] \quad \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta_T \cos \alpha_T \\ -\sin \alpha_T \\ \cos \beta_T \cos \alpha_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\varphi_7} \\ c_{\varphi_7} \end{bmatrix} \quad (16)$$

[0018] 式中: $g_\alpha(\cdot)$ 、 $g_\beta(\cdot)$ 为映射函数, α_T 和 β_T 为距骨绕定坐标系x、y轴的转角, α 、 β 和 γ 为足部绕定坐标系x、y和z轴的转角, $(b_{11}, b_{12}, b_{13})^T$ 为轴线 O_1B_{U1} 在定坐标系中的单位向量 b_1 , $(b_{21}, b_{22}, b_{23})^T$ 为轴线 O_1B_{U2} 在定坐标系中的单位向量 b_2 , φ_1 为轴线 O_1A_1 在定坐标系中的单位向量 a_1 与定坐标系x轴的夹角, φ_2 为单位向量 a_1 在定坐标系面yoz上的投影与定坐标系z轴的夹角, φ_3 为轴线 O_2C_1 在定坐标系中的单位向量 c_1 与动坐标系x轴的夹角, φ_4 为单位向量 c_1 在动坐标系面yoz上的投影与动坐标系x轴的夹角, φ_5 和 φ_6 分别为单位向量 b_i 与轴线 O_1A_i 和 O_2C_i 的夹角, φ_7 为双心线 O_1O_2 与单位向量 b_1 或 b_2 的夹角, O_1 为康复机器人的定球心, O_2 为康复机器人的动球心, b_i 为轴线 $O_1B_{U_i}$ 在定坐标系中的单位向量, B_{U_i} 为第i条第一连杆与第一支链刚柔耦合模块的转动中心, A_i 为第i条支链驱动电机与第一连杆的转动中心, C_i 为第i条支链第二连杆与动平台的转动中心, c_{φ_7} 为夹角 φ_7 的余弦值;定坐标系的原点位于康复机器人定球心,z轴垂直于动平台向下,y轴与第三支链第一连杆和第三支链刚柔耦合模块的转动轴

线重合,x轴服从右手定则;动坐标系的原点位于康复机器人的动球心,z轴垂直于动平台向下,x轴与第三支链第三连杆上端右侧和第三支链第二连杆另一端右侧的转动轴线重合,y轴服从右手定则。

[0019] 进一步的,所述单位向量 b_i 满足下述方程:

$$[0020] \quad \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} \\ c_{i1} & c_{i2} & c_{i3} \end{bmatrix} [b_{i1} \quad b_{i2} \quad b_{i3}]^T = \begin{bmatrix} c_{\varphi5} \\ c_{\varphi6} \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0021] 式中: (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}) 为轴线 O_1A_i 在定坐标系中的单位向量坐标, $(b_{i1}, b_{i2}, b_{i3})^T$ 为单位向量 b_i 的坐标, (c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}) 为轴线 O_2C_i 在定坐标系中的单位向量坐标, $c_{\varphi5}$ 为夹角 $\varphi5$ 的余弦值, $c_{\varphi6}$ 为夹角 $\varphi6$ 的余弦值。

[0022] 进一步的,所述第一支链第一连杆两端的转动轴线、第二支链第一连杆两端的转动轴线、第三支链第一连杆与第三支链刚柔耦合模块的转动轴线交于康复机器人的定球心;第一支链第二连杆两端的转动轴线、第二支链第二连杆两端的转动轴线、第三支链第二连杆两端和第三支链第三连杆的转动轴线以及第三支链第三连杆与动平台连接孔的轴线交于康复机器人的动球心。

[0023] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0024] 1.针对不同患者不同的胫距关节和距下关节运动耦合关系,在SS模型的基础上,在每条支链中加入刚柔耦合模块,不仅能实现踝关节的背/跖屈、内/外翻和内/外旋运动,而且在运动过程中通过刚柔耦合模块的扭簧微调动球心的位置,使动球心在以距骨长度为半径的球面上移动,以拟合距下关节的位置,实现胫距关节与距下关节之间的运动耦合,从而顺应患者足部的不同位置,以顺应不同患者的不同康复轨迹,提高踝关节康复效率,降低二次损伤的可能性。

[0025] 2.根据距骨姿态参数和足部姿态参数的映射关系,可得康复机器人的结构参数,实现康复机器人的优化设计。

附图说明

[0026] 图1是本发明的整体结构图;

[0027] 图2是本发明的定平台的结构图;

[0028] 图3是本发明在一个视角下的结构图;

[0029] 图4是本发明在另一视角下的结构图;

[0030] 图5是本发明的第一支链刚柔耦合模块的结构图;

[0031] 图6为本发明的第一支链刚柔耦合模块的剖视图;

[0032] 图中:1、定平台;2、动平台;3、第一支链;4、第二支链;5、第三支链;

[0033] 101、上连接板;102、定平台立柱;103、下连接板;104、基座;301、第一支链驱动电机;302、第一支链第一连杆;303、第一支链刚柔耦合模块;304、第一支链第二连杆;501、第三支链驱动电机;502、第三支链第一连杆;503、第三支链刚柔耦合模块;504、第三支链第二连杆;505、第三支链第三连杆;

[0034] 303-1、刚柔耦合模块第一连杆;303-2、刚柔耦合模块第二连杆;303-3、刚柔耦合模块第三连杆;303-4、刚柔耦合模块第四连杆;303-5、刚柔耦合模块扭簧。

具体实施方式

[0035] 下面结合附图给出具体实施例。具体实施例仅用于详细介绍本发明的技术方案，并不以此限定本申请的保护范围。

[0036] 本发明为一种刚柔耦合踝关节康复机器人，包括定平台1、动平台2、第一支链3、第二支链4和第三支链5；三条支链均与定平台1和动平台2连接，第一支链3和第二支链4对称分布在第三支链5两侧。

[0037] 所述定平台1包括上连接板101、定平台立柱102、下连接板103和基座104；基座104为铝型材焊接而成的框架结构，下连接板103位于基座104上，上连接板101通过多根动平台立柱102与下连接板103连接，上连接板101上开有容纳人体小腿的U型槽口，动平台2位于上连接板101和下连接板103之间的空间内。

[0038] 第一支链3和第二支链4的结构相同，以第一支链3为例进行说明，第一支链3包括第一支链驱动电机301、第一支链第一连杆302、第一支链刚柔耦合模块303和第一支链第二连杆304；其中，第一支链驱动电机301与定平台1的上连接板101固定连接，第一支链驱动电机301通过减速器与第一支链第一连杆302一端连接，第一支链第一连杆302另一端与第一支链刚柔耦合模块303转动连接，第一支链刚柔耦合模块303同时与第一支链第二连杆304一端转动连接，第一支链第二连杆304另一端与动平台2中后部转动连接。

[0039] 所述第三支链5包括第三支链驱动电机501、第三支链第一连杆502、第三支链刚柔耦合模块503、第三支链第二连杆504和第三支链第三连杆505；第三支链驱动电机501固定在定平台1的下连接板103的底部，第三支链驱动电机501的输出轴穿过下连接板103，通过减速器与第三支链第一连杆502一端连接，第三支链第一连杆502另一端与第三支链刚柔耦合模块503转动连接，第三支链刚柔耦合模块503同时与第三支链第二连杆504一端转动连接，第三支链第二连杆504另一端的两侧分别与第三支链第三连杆505上端的两侧转动连接，第三支链第三连杆505的下端与动平台2中后部固定连接；

[0040] 上述第一支链第一连杆302两端的转动轴线、第二支链第一连杆两端的转动轴线、第三支链第一连杆502与第三支链刚柔耦合模块503的转动轴线交于一点，此点为康复机器人的定球心 O_1 ；第一支链第二连杆304两端的转动轴线、第二支链第二连杆两端的转动轴线、第三支链第二连杆504两端和第三支链第三连杆505的转动轴线以及第三支链第三连杆505与动平台2连接孔的轴线交于一点，此点为康复机器人的动球心 O_2 。

[0041] 三条支链的刚柔耦合模块的结构相同，其中，第一支链刚柔耦合模块303包括刚柔耦合模块第一连杆303-1、刚柔耦合模块第二连杆303-2、刚柔耦合模块第三连杆303-3、刚柔耦合模块第四连杆303-4和刚柔耦合模块扭簧303-5；其中，刚柔耦合模块第二连杆303-2两端分别通过连接轴与刚柔耦合模块第一连杆303-1和刚柔耦合模块第四连杆303-4转动连接，刚柔耦合模块第三连杆303-3两端分别通过连接轴与刚柔耦合模块第一连杆303-1和刚柔耦合模块第四连杆303-4转动连接，刚柔耦合模块第一连杆303-1、刚柔耦合模块第二连杆303-2、刚柔耦合模块第三连杆303-3和刚柔耦合模块第四连杆303-4相互之间的连接点组成一个平行四边形，每个连接轴上均安装一个刚柔耦合模块扭簧303-5，用于实现平行四边形的复位；刚柔耦合模块第一连杆303-1一端与第一支链第一连杆302另一端转动连接，刚柔耦合模块第四连杆303-4一端与第一支链第二连杆304一端转动连接。

[0042] 使用时将患者足部绑缚在动平台2上，通过控制器控制三条支链的驱动电机，使动

平台2绕着动球心运动,动平台2带动患者足部运动,实现踝关节的康复训练。该机器人具备三个转动自由度和两个移动自由度,三个转动自由度体现在三个驱动电机可以实现动平台2姿态的完全控制,实现踝关节的背/趾屈、内/外翻以及内/外旋。两个移动自由度体现在三条支链的刚柔耦合模块通过扭簧微调动球心的位置,使动球心在以距骨长度为半径的球面上移动,以拟合患者距下关节的位置,从而顺应患者足部的不同位置,故该康复机器人可以控制动平台位姿,以顺应不同患者的康复轨迹。

[0043] 踝关节除刚性的踝骨结构外,还包括了众多复杂的组织韧带,在其作用下胫距关节与距下关节之间不再相互独立,而是产生了运动耦合,这使得踝关节宏观上仅体现出三个自由度,即矢状面内的背/趾屈,冠状面内的内/外翻以及绕人体纵轴(水平面)的内/外旋运动,而距骨的瞬时姿态与这三个宏观运动转角相关。因此,为精准描述踝关节的瞬时运动规律,在SS型踝骨结构的基础上,考虑踝组织韧带的作用影响,提出本发明的踝关节康复机器人。

[0044] 上述康复机器人用于踝关节康复训练时,构造一种可描述踝关节距骨与足部运动相关性的“足-距关联运动模型”,即人机系统模型。定义康复机器人的定坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 原点与定球心 o_1 重合, z_1 轴垂直于动平台向下, y_1 轴与第三支链第一连杆502和第三支链刚柔耦合模块503的转动轴线重合, x_1 轴由右手定则确定;康复机器人的动坐标系 $o_2-x_2y_2z_2$ 原点与动球心 o_2 重合, z_2 轴垂直于动平台向下, x_2 轴与第三支链第三连杆505上端右侧和第三支链第二连杆504另一端右侧的转动轴线重合, y_2 轴由右手定则确定。

[0045] 足部姿态矩阵表示为:

$$[0046] \quad R_{\text{Foot}} = \text{Rot}(x_1, \alpha) \text{Rot}(y_1, \beta) \text{Rot}(z_1, \gamma) \quad (1)$$

$$[0047] \quad \text{Rot}(x_1, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, \quad \text{Rot}(y_1, \beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}, \quad \text{Rot}(z_1, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0048] 式中: $\text{Rot}(x_1, \alpha)$ 、 $\text{Rot}(y_1, \beta)$ 和 $\text{Rot}(z_1, \gamma)$ 为足部绕定坐标系各轴的旋转矩阵, α 、 β 和 γ 为足部绕定坐标系各轴的转角,即踝关节的背/趾屈、内/外翻以及内/外旋角, $\alpha \in (-30^\circ, 45^\circ)$, $\beta \in (-22^\circ, 22^\circ)$, $\gamma \in (-36^\circ, 36^\circ)$;

[0049] 距骨姿态矩阵表示为:

$$[0050] \quad R_{\text{Talus}} = \text{Rot}(x_1, \alpha_T) \text{Rot}(y_1, \beta_T) \text{Rot}(z_1, \gamma_T) \quad (3)$$

[0051] 式中: $\text{Rot}(x_1, \alpha_T)$ 、 $\text{Rot}(y_1, \beta_T)$ 和 $\text{Rot}(z_1, \gamma_T)$ 为距骨绕定坐标系各轴的旋转矩阵, α_T 、 β_T 和 γ_T 为距骨绕定坐标系各轴的转角,即距骨的背/趾屈、内/外翻以及内/外旋角度;

[0052] 利用动坐标系相对于定坐标系的位姿变换矩阵可用于踝关节瞬时运动描述,故被定义为“踝关节运动矩阵”,表示为:

$$[0053] \quad \mathbf{T}_{\text{Ankle}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\text{Foot}} & \mathbf{p}_{\text{Talus}} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[0054] \quad \mathbf{p}_{\text{Talus}} = R_{\text{Talus}}(0, 0, 1)^T \quad (5)$$

[0055] 式中: $\mathbf{p}_{\text{Talus}}$ 为胫距关节中心在定坐标系中的位置向量,1为距骨长度;

[0056] 将式(3)带入式(5)中不难发现,向量 $\mathbf{p}_{\text{Talus}}$ 与距骨内/外旋角 γ_T 无关,即 γ_T 并不影响踝关节的运动描述,故仅将转角 α_T 和 β_T 定义为距骨运动参数,转角 α 、 β 和 γ 定义为足部姿态参数;

[0057] 将距骨姿态参数 (α_T/β_T) 随足部姿态参数 $(\alpha/\beta/\gamma)$ 变化的函数模型定义为“足-距关联运动模型”，由于距骨背屈与外翻量分别与足部背屈与外翻转角的线性相关性最高，故将足-距关联运动模型表示为：

$$[0058] \quad \begin{cases} \alpha_T = k_\alpha \alpha + E_\alpha(\alpha, \beta, \gamma), & E_\alpha \ll \alpha_T \\ \beta_T = k_\beta \beta + E_\beta(\alpha, \beta, \gamma), & E_\beta \ll \beta_T \end{cases} \quad (6)$$

[0059] 式中： k_α 、 k_β 为比例因子， $E_\alpha(\alpha, \beta, \gamma)$ 、 $E_\beta(\alpha, \beta, \gamma)$ 为误差函数；

[0060] 为保证康复机器人结构对称性，轴线 0_1A_0 与定坐标系的 z_1 轴重合，轴线 0_1A_1 与 0_1A_2 关于面 $y_1o_1z_1$ 对称布置， A_0 为第三支链第三连杆505和动平台2连接中心， A_1 为第一支链驱动电机301与第一支链第一连杆302的转动中心， A_2 为第二支链驱动电机与第二支链第一连杆的转动中心，因此，轴线 0_1A_i ($i=0, 1, 2$) 在定坐标系中的单位向量 a_i 可通过球坐标表示为：

$$[0061] \quad \begin{cases} a_0 = (a_{01}, a_{02}, a_{03}) = (0, 0, 1)^T \\ a_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}) = (c_{\varphi_1}, s_{\varphi_2} s_{\varphi_1}, c_{\varphi_2} s_{\varphi_1})^T \\ a_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23}) = (-c_{\varphi_1}, s_{\varphi_2} s_{\varphi_1}, c_{\varphi_2} s_{\varphi_1})^T \end{cases} \quad (7)$$

[0062] 式中： φ_1 为单位向量 a_1 与 x_1 轴的夹角， φ_2 为单位向量 a_1 在面 $y_1o_1z_1$ 上的投影与 z_1 轴的夹角， s_{φ_1} 、 c_{φ_1} 为夹角 φ_1 的正弦值和余弦值， s_{φ_2} 、 c_{φ_2} 为夹角 φ_2 的正弦值和余弦值；

[0063] 轴线 0_2C_0 与 x_2 轴重合，轴线 0_2C_1 与 0_2C_2 关于面 $y_2o_2z_2$ 对称布置， C_0 为第三支链第二连杆右侧与第三支链第三连杆右侧的转动中心， C_1 为第一支链第二连杆与动平台的转动中心， C_2 为第二支链第二连杆与动平台的转动中心；因此，轴线 0_2C_i ($i=0, 1, 2$) 在定坐标系中的单位向量 c_i 可通过球坐标表示为：

$$[0064] \quad \begin{cases} c_0 = (c_{01}, c_{02}, c_{03}) = (1, 0, 0)^T \\ c_1 = (c_{11}, c_{12}, c_{13}) = (c_{\varphi_4} s_{\varphi_3}, s_{\varphi_4} s_{\varphi_3}, c_{\varphi_3})^T \\ c_2 = (c_{21}, c_{22}, c_{23}) = (-c_{\varphi_4} s_{\varphi_3}, s_{\varphi_4} s_{\varphi_3}, c_{\varphi_3})^T \end{cases} \quad (8)$$

[0065] 式中： φ_3 为单位向量 c_1 与 x_2 轴的夹角， φ_4 为单位向量 c_1 在面 $y_2o_2z_2$ 上的投影与 x_2 轴的夹角， s_{φ_3} 、 c_{φ_3} 为夹角 φ_3 的正弦值和余弦值， s_{φ_4} 、 c_{φ_4} 为夹角 φ_4 的正弦值和余弦值；

[0066] 轴线 0_1B_{Ui} 平行于 0_2B_{Li} ($i=0, 1, 2$)， B_{Ui} 为第 i 条支链第一连杆与刚柔耦合模块的转动中心， B_{Li} 为第 i 条支链刚柔耦合模块与第二连杆的转动中心，故轴线 0_1B_{Ui} 在定坐标系中的单位向量 b_i 表示为：

$$[0067] \quad b_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3})^T \quad (9)$$

[0068] 根据动坐标系相对于定坐标系的位姿变换矩阵可以计算轴线 0_2C_i 在定坐标系中的单位向量坐标为：

$$[0069] \quad 0_2C_i = R_{\text{Foot}} \times c = (c_1, c_2, c_3)^T \quad (10)$$

[0070] 定义同时垂直于轴线 0_1A_i 和 0_2C_i 的向量为 d_i ，其表示为：

$$[0071] \quad d_i = (d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}) = 0_1A_i \times 0_2C_i = (a_{i2}c_{i3} - a_{i3}c_{i2}, a_{i3}c_{i1} - a_{i1}c_{i3}, a_{i1}c_{i2} - a_{i2}c_{i1}), i=0, 1, 2 \quad (11)$$

[0072] 根据单位向量 b_i 与轴线 0_1A_i 和 0_2C_i 的夹角分别为 φ_5 和 φ_6 ，由此可建立下述方程：

$$[0073] \quad \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} \\ c_{i1} & c_{i2} & c_{i3} \end{bmatrix} [b_{i1} \quad b_{i2} \quad b_{i3}]^T = \begin{bmatrix} c_{\varphi 5} \\ c_{\varphi 6} \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0074] 其中, $c_{\varphi 5}$ 和 $c_{\varphi 6}$ 分别为夹角 $\varphi 5$ 和 $\varphi 6$ 的余弦值;

[0075] 经计算得到:

$$[0076] \quad b_{ij} = \pm (-1)^{i+1} \frac{d_{ij}}{1-D_i^2} \sqrt{s_{\varphi 5}^2 s_{\varphi 6}^2 - (D_i - c_{\varphi 5} c_{\varphi 6})^2} + \frac{a_{ij} - c_{ij} D_i}{1-D_i^2} c_{\varphi 5} + \frac{c_{ij} - a_{ij} D_i}{1-D_i^2} c_{\varphi 6}, i=0,1,2; j=1,2,3 \quad (13)$$

$$[0077] \quad \begin{aligned} D_i &= (-1)^i s_{\varphi 1} s_{\varphi 3} \sin \beta \cos(\alpha + \varphi_2) \cos[\gamma - (-1)^i \varphi_4] - (-1)^i s_{\varphi 1} s_{\varphi 3} \sin(\alpha + \varphi_2) \sin[\gamma - (-1)^i \varphi_4] \\ &+ s_{\varphi 1} c_{\varphi 3} \cos \beta \cos(\alpha + \varphi_2) - (-1)^i c_{\varphi 1} c_{\varphi 3} \sin \beta + c_{\varphi 1} s_{\varphi 3} \cos \beta \cos[\gamma - (-1)^i \varphi_4] \end{aligned} \quad (14)$$

[0078] 在康复运动中, 康复机器人的双心线 $O_1 O_2$ 始终与踝关节距骨重合, 故根据公式 (4), 双心线 $O_1 O_2$ 在定坐标系内的单位向量坐标可以表示为:

$$[0079] \quad \frac{O_1 O_2}{|O_1 O_2|} = \frac{\mathbf{p}_{Talus}}{|\mathbf{p}_{Talus}|} = (\sin \beta_T \cos \alpha_T, -\sin \alpha_T, \cos \beta_T \cos \alpha_T) \quad (15)$$

[0080] 为保证康复机器人结构的对称性, 令双心线 $O_1 O_2$ 与向量 b_1 与 b_2 的夹角相等, 均为 $\varphi 7$, 由此可以得到:

$$[0081] \quad \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta_T \cos \alpha_T \\ -\sin \alpha_T \\ \cos \beta_T \cos \alpha_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\varphi 7} \\ c_{\varphi 7} \end{bmatrix} \quad (16)$$

[0082] 经过整理可以得到:

$$[0083] \quad \begin{cases} \alpha_T = \sin^{-1} \left(\frac{B_2 \sqrt{B_4 - 2c_{\varphi 7}^2}}{\mp B_4 \sqrt{2 - B_4}} - \frac{b_{12} + b_{22}}{B_4} c_{\varphi 7} \right) \\ \beta_T = \tan^{-1} \left(\frac{\mp B_1 + \frac{(b_{11} + b_{21}) \sqrt{2 - B_4}}{\sqrt{B_4 - 2c_{\varphi 7}^2}} c_{\varphi 7}}{\pm B_3 + \frac{(b_{23} + b_{13}) \sqrt{2 - B_4}}{\sqrt{B_4 - 2c_{\varphi 7}^2}} c_{\varphi 7}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

$$[0084] \quad \begin{cases} B_1 = b_{12} b_{23} - b_{13} b_{22} \\ B_2 = b_{11} b_{23} - b_{21} b_{13} \\ B_3 = b_{12} b_{21} - b_{11} b_{22} \\ B_4 = b_{12} b_{22} + b_{13} b_{23} + b_{11} b_{21} + 1 \end{cases} \quad (18)$$

[0085] 结合公式 (17)、(18)、(13)、(14) 与 (11) 可以得到距骨姿态参数 (α_T / β_T) 与足部姿态参数 ($\alpha / \beta / \gamma$) 的映射关系, 其表示为:

$$[0086] \quad \begin{cases} \alpha_T = g_\alpha(\alpha, \beta, \gamma, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7) \\ \beta_T = g_\beta(\alpha, \beta, \gamma, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7) \end{cases} \quad (19)$$

[0087] 式中: $g_\alpha(\cdot)$ 、 $g_\beta(\cdot)$ 为映射函数;

[0088] 已知距骨姿态参数 (α_T / β_T) 和足部姿态参数 ($\alpha / \beta / \gamma$), 根据式 (19) 可得康复机器人的结构参数 ($\varphi_1 / \varphi_2 / \varphi_3 / \varphi_4 / \varphi_5 / \varphi_6 / \varphi_7$), 实现康复机器人的优化设计。

[0089] 本发明未述及之处适用于现有技术。

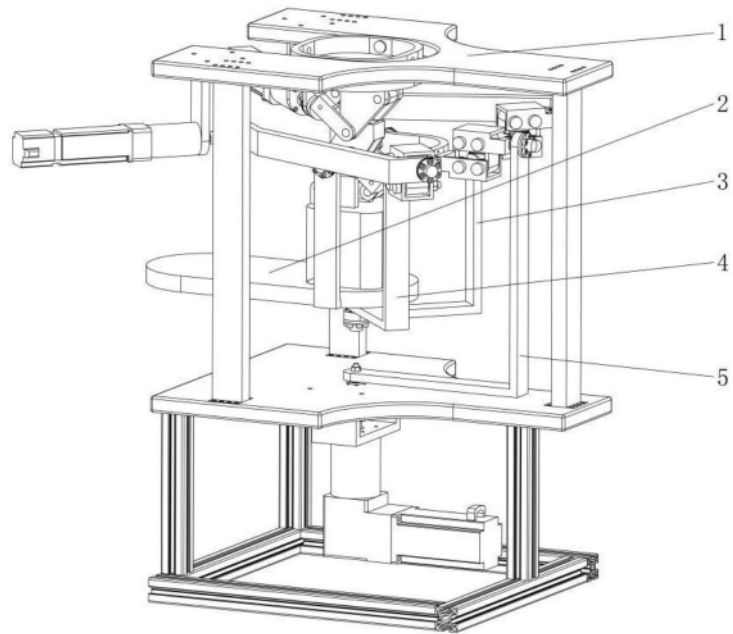


图1

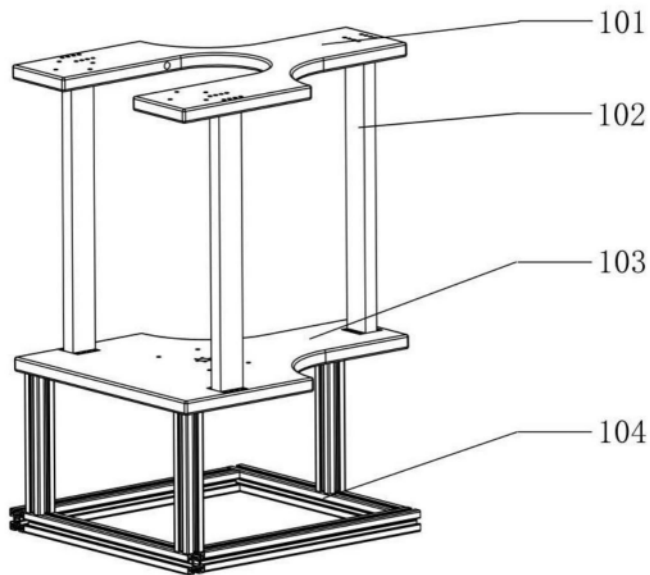


图2

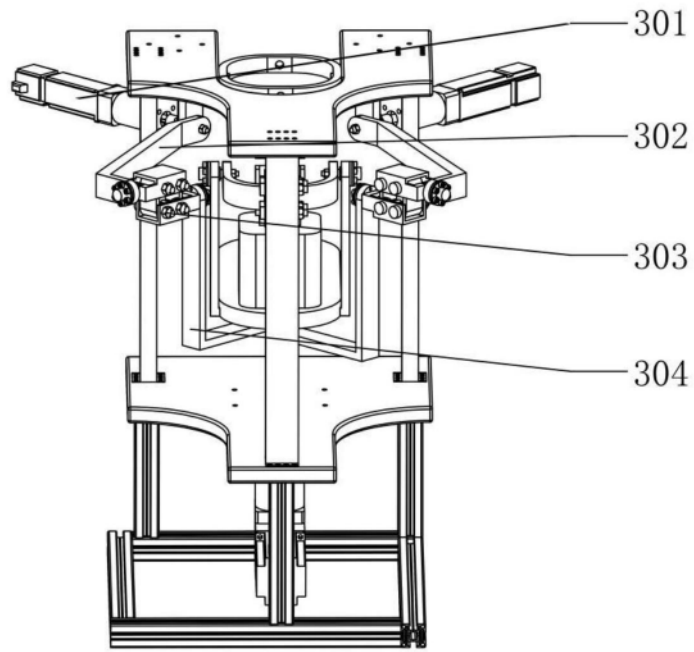


图3

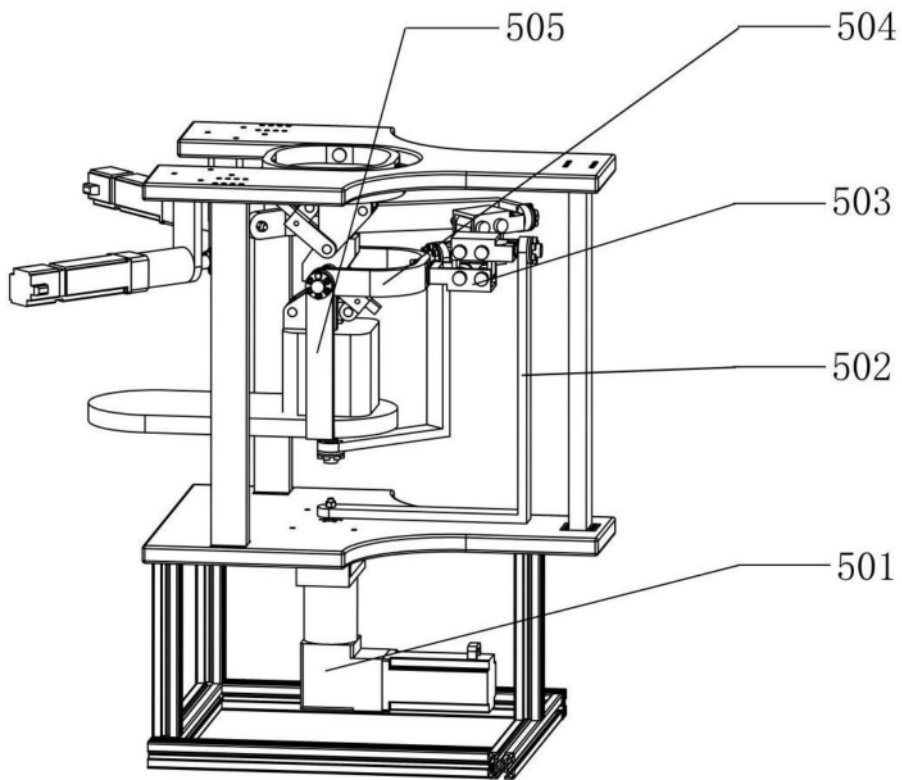


图4

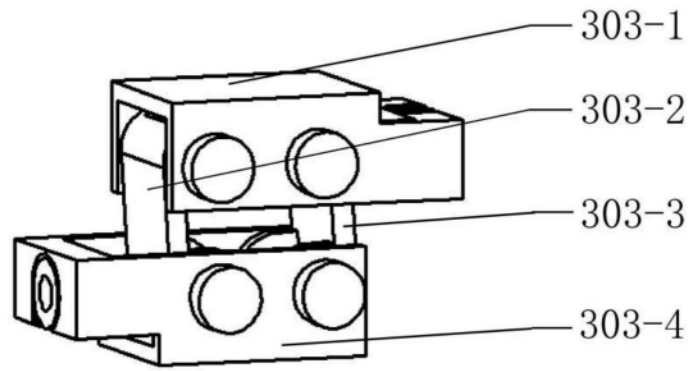


图5

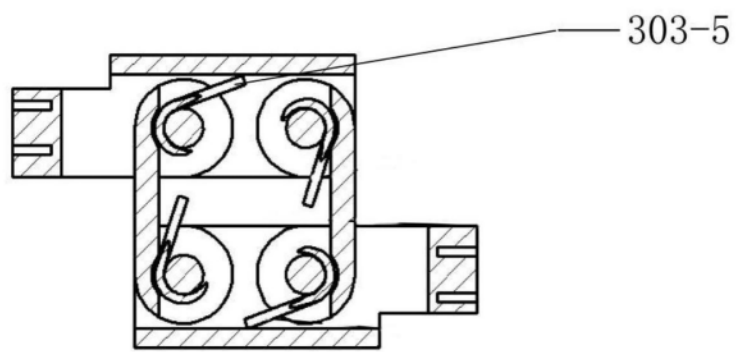


图6