DOI: 10.3901/JME.2020.11.072

变轴线生物融合式膝关节康复机构型综合*

王 森^{1,2} 李艳文^{1,2} 陈子明^{1,2} 宋加涛^{1,2} 梁文龙^{1,2} 朱为国³

(1. 燕山大学河北省并联机器人与机电系统实验室 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004;

3. 淮阴工学院先进制造技术重点实验室 淮安 223003)

摘要: 以一种具有变轴线转动的 1R 人体膝关节模型为基础, 提出一种膝关节与外骨骼轴线自动对准的生物融合式膝关节康复机构型综合的方法, 并综合出了一系列生物融合式膝关节康复机构。给出一种膝关节与外骨骼关节轴线自动对准的运动补偿条件, 基于螺旋理论构建符合运动补偿条件的生物融合式膝关节康复机构的基本模型; 以生物融合式膝关节康复机构为研究对象, 用改进的 G-K 公式分析了生物融合式膝关节康复机构的自由度, 并用运动学仿真软件验证了运动补偿的正确性, 进而确定了机构综合的合理性, 为生物融合式膝关节康复机构型综合的设计提供了新的思路。

关键词: 生物融合; 膝关节康复; 螺旋理论; 运动补偿; 型综合; 康复机构

中图分类号: TP242

Type Synthesis of Rehabilitation Mechanism of Variable Axis Bio-fusion Knee Joint

WANG Sen^{1,2} LI Yanwen^{1,2} CHEN Ziming^{1,2} SONG Jiatao^{1,2}

LIANG Wenlong^{1,2} ZHU Weiguo³

(1. Parallel Robot and Mechatronic System Laboratory of Hebei Province, Yanshan University,

Qinhuangdao 066004;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

3. Advanced Manufacturing Technology Key Laboratory, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003)

Abstract: A new 1R human knee model which is based on a variable axis rotation, the method of configuration synthesis of bio-fusion knee rehabilitation mechanism with automatic alignment of knee joint and exoskeleton axis are proposed, then a series of bio-fusion knee rehabilitation mechanisms are summarized. There is an effective way that a motion compensatory condition for the automatic alignment of the axis of knee joint and exoskeleton joint, and constructs the basic model of the bio-fusion knee joint rehabilitation mechanism, which is based on the spiral theory. Treating the bio-fusion knee joint rehabilitation mechanism as the research object, the freedom of the bio-fusion knee joint rehabilitation mechanism is analyzed with the improved G-K formula, and the kinematics simulation software is used the accuracy of motion compensation is verified by the simulation results, and then the rationality of mechanism synthesis is determined, which provides a new idea for the design method of configuration synthesis of bio-fusion knee joint rehabilitation mechanism.

Key words: bio-fusion; rehabilitation of knee joint; spiral theory; motion compensation; type synthesis; rehabilitation mechanism

0 前言

现有的膝关节康复机构基本可分为两种类型:

串联机构和并联机构。具有代表性的串联机构如 CPM 训练器^[1], 其机械结构原理上为曲柄滑块机构, 通过滑块的往复运动带动人体小腿进行膝关节的康复运动。在实际康复过程中, 会出现膝关节和外骨骼轴线发生相对位移, 使得膝关节轴线与外骨骼轴线之间不能共线, 而且在两者绑定的位置处会产生额外的力和力矩, 虽然两者间的相对运动被肌肉等

* 国家自然科学基金(51775474)、河北省自然科学基金(E2016203321)、江苏省重点实验室项目(HGAMTL-1708)和河北省重点研发计划(19221909D)资助项目。20191112 收到初稿, 20200213 收到修改稿

软组织形变所补偿,但是作用力和作用力矩会在康复过程产生不良的影响,甚至对病人造成二次伤害。为改进这一缺点北京航空航天大学^[2]用平面并联机构模拟膝关节工作空间的复杂运动,但即使了解了膝关节的运动轨迹,通过运动学反解计算出驱动函数,由于个体差异的原因,每个人的膝关节运动轨迹都不尽相同,一套康复装置无法满足所有人的康复需求。因此,需要研发出一种能够满足不同个体需求的变轴线生物融合式膝关节康复机构。

为提高机构的性能,可以以人体膝关节轴线和外骨骼轴线相对位置的调整作为可穿戴设备设计的目标。综上所述,康复装置需要实现穿戴者关节与外骨骼关节康复机构运动的一致性。可以采用型综合的理论,综合出一类新型的膝关节康复机构。这类机构具有自动调整外骨骼与人体膝关节轴线相对位置的能力,而且易于控制。

机构的型综合问题是机构学理论中一个重要的研究内容。目前,在少自由度并联机构型综合方面取得的研究成果较多,对于并联机构的型综合方法有以下几种:HUANG 等^[3]提出了基于运动螺旋与反螺旋的型综合方法,综合出一系列分支对称的少自由度并联机构。YANG^[4]提出了基于单开链(SOC)单元的并联机构型综合方法而且得到若干新型并联机构。GOGU^[5]采用线性变换的思想,系统研究并联机构自由度和型综合的问题。KONG 等^[6]基于虚拟链法对几种常用运动模式的并联机构进行构型综合。文献[7]基于 GF 集理论对仿生四足步行机器人进行类型综合。文献[8]基于位移子群的型综合位移流形综合原理,对 3R2T 并联机构进行系统综合;此外其他学者对具有连续转轴^[9]、螺旋运动并联机构^[10]、各向同性并联机构^[11]、恒定雅可比矩阵移动并联机构^[12]、完全解耦并联机构^[13]等不同类型机构开展了型综合研究。

用螺旋理论研究空间机构的一些问题是比较方便的。相对于其他方法,螺旋理论^[14]具有几何概念清楚、物理意义明确、表达形式简单和代数运算方便等优点,而且螺旋理论易于与其他方法如矢量法、矩阵法和运动影响系数法之间相互转化。这在诸多数学工具中是较好的一种。但是用传统螺旋理论的型综合办法,无法直接综合出变轴线转动的单自由度膝关节康复机构。因此,寻求变轴线转动的单自由度膝关节康复机构型综合的理论和方法,是机构学的一个新的方向和难题。本文从具有变轴线转动的 1R 人体膝关节运动支链出发,提出一种以膝关节轴线自对准为前提的运动补偿条件,构建一类生物融合式膝关节康复新机构,进一步丰富和扩充了

型综合的理论和方法。

1 生物融合康复机构型综合方法

由膝关节解剖学可知,膝关节是由股骨、胫骨和髌骨构成的复合关节,为人体最大且构造最复杂的关节,如图 1 所示。膝关节的主要运动是人体在矢状面内的屈曲运动,并且股骨和胫骨之间的相对运动,是滚动和滑动的复合运动。文献[15]利用磁共振成像(MRI)研究了膝关节的形状和相对运动,关节面处的运动不仅仅是围绕一个点旋转,而且还存在着旋转中心的移动。瞬时转动中心的轨迹可以看成“J”形曲线。这项研究表明膝关节的运动不能简化为绕固定轴旋转,人体膝关节矢状面的运动是变轴线的转动运动。文献[16]在 2008 年基于椭圆几何的接触运动学理论对膝关节模型进行分析发现膝关节的股骨关节面可以近似为椭圆。

基于上述研究,本文提出一种轴线自对准的生物融合式膝关节康复机构型综合的方法。首先建立具有变轴线转动的 1R 人体膝关节模型,在此膝关节运动分支的基础上,通过添加串联支链的方法,基于螺旋理论构建符合运动补偿条件的生物融合式膝关节康复机构的基本模型;最后以生物融合式膝关节康复机构为研究对象,用改进的 G-K 公式计算了生物融合式膝关节康复机构自由度,并用运动学仿真软件验证了运动补偿的正确性,从而确定了机构综合的合理性。

1.1 具有变轴线转动的 1R 人体膝关节三维模型

如图 1 所示,以具有变轴线转动的 1R 人体膝关节运动支链为研究对象,在动定平台中间添加运动支链构成轴线自对准的生物融合式膝关节康复机构。

图 1 具有变轴线转动的 1R 人体膝关节三维模型

1. 定平台 2. 股骨 3. 胫骨 4. 动平台 5. 髌骨

1.2 膝关节轴线自动对准的运动补偿原理

如图2所示,在定平台中心点建立坐标系 oxy , o 为坐标系原点。在动平台的基准面 I 中间位置布置驱动副,驱动副的轴线与人体矢状面垂直。由图2的几何关系可得出,驱动副的转角 γ 等于膝关节转动角度 θ ,可以实现完全解耦,控制方便。并且机构中融入人体膝关节进行分析,实现变轴线的转动运动,和人体膝关节矢状面内的运动完全贴合,自动实现运动补偿,图2中“J”形曲线表示膝关节瞬心变化轨迹。

图2 生物融合膝关节康复机构运动补偿原理图解

1. 瞬心轨迹 2. 基准面 I 3. 驱动副(动平台中心点)

如图2分析可知,动平台中心点的运动轨迹和膝关节的股骨关节面一样,近似为椭圆轨迹,椭圆的圆心为 o_1 ,以 o_1 为坐标系原点,建立分支坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$, x_1 轴方向与 x 轴方向平行,定坐标系原点 o 与 o_1 在同一条直线上,由几何关系可得

$$\frac{x_A^2}{a^2} + \frac{z_A^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

$$x_A = r \sin \theta \quad (2)$$

$$z_A = r \cos \theta \quad (3)$$

求解式(1)~(3)可得,固定坐标系下,动平台中心点的位置坐标 x_d 、 z_d 可以表示为

$$x_d = \frac{ab \sin \theta}{\sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

$$z_d = \frac{ab \cos \theta}{\sqrt{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta}} + h_1 \quad (5)$$

式中, h_1 为股骨关节面中心到定平台中心点沿 z 轴方向的距离; a 、 b 分别表示以 o_1 为椭圆圆心的动平台中心点椭圆运动轨迹的长轴和短轴半径; r 表示椭圆半径; x_A 、 z_A 分别表示动平台中心点 A 在分支坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 下的投影坐标。

通过式(4)、(5)分析可知动平台中心点的运动轨迹由驱动副转角和人体膝关节面的形状决定,通过控制驱动副可以完全控制膝关节的转角,由于不同的人有

不同的膝关节面轮廓从而导致 a 、 b 是不一样的,驱动副转角决定运动轨迹角度,具有变轴线转动的1R人体膝关节决定了运动轨迹尺寸形状,在康复运动过程保证了动平台中心点能够走出符合膝关节运动规律的椭圆轨迹,无需考虑外骨骼和人体膝关节轴线之间具体的位置变化,自动实现运动补偿,满足康复需求。

1.3 膝关节轴线自对准的运动补偿条件

为了补偿膝关节在屈伸运动过程中瞬时转动中心的位移,提出了一种膝关节康复机构轴线自对准的运动补偿条件。

(1) 所添加的运动分支与动、定平台构成的并联机构具有平行于膝关节矢状面的两平移—转动三个自由度,其中转动自由度的转轴平行于 y 轴。

(2) 驱动副轴线与人体矢状面垂直,位于动平台的基准面 I 的中心位置。

运动补偿条件(1)保证了没有确定运动的受损膝关节在矢状面内进行正确的康复运动。

运动补偿条件(2)满足图2的几何条件,这样的布置保证了驱动转角等于膝关节转角,结合生物融合式膝关节康复机构运动补偿原理,实现膝关节轴线的自动对准。

1.4 生物融合式膝关节康复机构型综合的步骤

具有变轴线转动的生物融合式膝关节康复机构其构型综合流程图如图3所示。

图3 生物融合式膝关节康复机构型综合流程图

2 生物融合式膝关节康复机构型综合

首先根据运动补偿条件(1)确定所添加的串联支链构成的并联机构所需自由度,写出其运动螺旋系,通过求反螺旋的方法获得约束螺旋系,再确定分支约束螺旋系,并求与分支约束螺旋系相逆的基础运动螺旋系,对基础运动螺旋系进行线性组合,含有驱

动副的分支必须按照运动补偿条件(2)构造串联运动分支。构造出符合约束要求的串联运动分支, 根据实际要求选择几组适当的运动分支, 添加到 1R 人体膝关节运动支链两侧, 并对机构的瞬时性进行判别, 构造出轴线自对准的生物融合式膝关节康复机构。

2.1 运动分支是 5 自由度的膝关节康复机构

根据运动补偿条件(1), 需要添加的运动支链与动定平台构成的并联机构具有平行于膝关节矢状面的两平移—转动三个自由度, 写出满足上述条件的运动螺旋

$$\begin{cases} \mathcal{S}_x = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_z = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_y = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)求解约束反螺旋, 得到机构的 3 个约束力螺旋的基本解析式

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_2^r = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_3^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (7)$$

式中的 $\mathcal{S}_1^r$, $\mathcal{S}_2^r$ 表示 2 个空间相互垂直的力偶矢量, $\mathcal{S}_3^r$ 表示一个力线矢。

考虑分支自由度是 5 自由度的情况, 并且分支构成的并联机构不存在公共约束, 这样并联机构中仅含有三个分支, 而且约束力螺旋是平均分配的, 即每个分支都分别与式(7)中的一个约束力螺旋互逆。与 $\mathcal{S}_1^r$ 互逆的运动螺旋为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{115} = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{125} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0) \\ \mathcal{S}_{135} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{145} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{155} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\mathcal{S}_{ik}$ 表示运动螺旋($i=1, 2, 3$ 表示分支序号, $k=1, 2, 3, 4, 5$ 表示运动副序号, $k=3, 4, 5$ 表示分支自由度数)。

对式(8)中的 5 个运动螺旋进行线性组合, 线性组合后可得到其他多种形式含驱动副的运动螺旋, 必须满足线性组合后的运动螺旋线性无关, 只有按照运动补偿条件(2)对运动螺旋 $\mathcal{S}_{145}$ 、 $\mathcal{S}_{115}$ 、 $\mathcal{S}_{135}$ 进行线性组合才能构成驱动副, 则根据要求可以添加的 3T2R 运动分支支链如表 1 所示。

表 1 含有驱动副的 3T2R 运动支链

分支中含两个移动副	分支中含一个移动副	分支中不含移动副	分支中含有圆柱副	分支中含有万向铰
${}^xR {}^xR {}^k_1P {}^k_2P {}^yR$	${}^kP {}^xR {}^yR {}^yR$	${}^xR {}^xR {}^xR {}^yR {}^yR$	${}^xC {}^xR {}^yR {}^yR$	${}^xR {}^xR {}^xU {}^yR {}^yR$
${}^xR {}^k_1P {}^k_2P {}^xR {}^yR$	${}^xR {}^kP {}^xR {}^yR {}^yR$		${}^xC {}^kP {}^xR {}^yR$	${}^xR {}^xR {}^xR {}^xU {}^y$
${}^k_1P {}^xR {}^xR {}^k_2P {}^yR$	${}^xR {}^xR {}^kP {}^yR {}^yR$		${}^xC {}^xR {}^kP {}^yR$	${}^xR {}^xU {}^yR {}^yR {}^yR$
${}^k_1P {}^k_2P {}^xR {}^xR {}^yR$	${}^xR {}^xR {}^yR {}^kP {}^yR$		${}^xR {}^xC {}^xR {}^yR$	${}^k_1P {}^xR {}^k_2P {}^xU {}^y$
${}^k_1P {}^xR {}^k_2P {}^xR {}^yR$	${}^xR {}^kP {}^xR {}^xR {}^yR$		${}^xR {}^xR {}^xC {}^yR$	${}^xR {}^kP {}^xU {}^yR {}^yR$
${}^k_1P {}^xR {}^k_2P {}^xR {}^yR$	${}^xR {}^xR {}^kP {}^xR {}^yR$		${}^kP {}^xC {}^xR {}^yR$	${}^yU {}^x {}^xR {}^xU {}^y$
	${}^xR {}^xR {}^xR {}^kP {}^yR$		${}^xR {}^xC {}^kP {}^yR$	${}^yU {}^x {}^kP {}^xR {}^yR$
			${}^kP {}^xR {}^xC {}^yR$	${}^kP {}^xR {}^xR {}^xU {}^y$
				${}^xR {}^kP {}^xR {}^xU {}^y$

表 1 中 R 表示转动副, P 表示移动副, U 表示胡克铰, C 表示圆柱副。字母上标 y 表示运动副轴线与图 2 的基准面 I 垂直, x 表示运动副轴线平行于图 2 的固定坐标系 x 轴, k 、 k_1 、 k_2 表示移动副轴线为空间任意方向。与 $\mathcal{S}_2^r$ 互逆的运动螺旋系表示的也是一个被约束转动运动的螺旋系, 分析结果与式(8)相同, 把表 1 中 x 向转动副替换成 z 向转动副即可, 下文符号表示同上。与 $\mathcal{S}_3^r$ 互逆的运动螺旋只需要用式(9)的 $\mathcal{S}_{315}$ 替换式(8)的 $\mathcal{S}_{125}$ 即可

$$\mathcal{S}_{315} = (0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \quad (9)$$

通过对 $\mathcal{S}_{115}$ 、 $\mathcal{S}_{315}$ 、 $\mathcal{S}_{135}$ 、 $\mathcal{S}_{145}$ 和 $\mathcal{S}_{155}$ 5 个运动螺旋的线性组合, 可得到多种形式的运动螺旋, 必须满足线性组合后的运动螺旋线性无关, 则根据要求可以添加的 3R2T 运动分支支链如表 2 所示。

其中 $(RR)_N$ 表示 2R 球面子副, 下标 N 表示连续的两个转动副轴线交于同一点, 该点称为分支中心点。

表 2 3R2T 运动分支支链

分支中含两个移动副	分支中含一个移动副	分支中不含移动副
${}^xP {}^xP {}^xP {}^S$	${}^xP {}^yR {}^S$	${}^yR {}^yR {}^S$
${}^S {}^xP {}^xP {}^P$	${}^yR {}^xP {}^S$	${}^yR {}^S {}^yR$
${}^xP {}^S {}^xP {}^P$	${}^yR {}^S {}^xP {}^P$	${}^S {}^yR {}^yR$
${}^xP {}^xP {}^yR (RR)_N$	${}^xP {}^S {}^yR$	$(RR)_N {}^yR {}^yR {}^yR$
${}^xP {}^yR {}^xP (RR)_N$	${}^S {}^xP {}^yR$	${}^yR (RR)_N {}^yR {}^yR$
${}^yR {}^xP {}^xP (RR)_N$	${}^S {}^yR {}^xP {}^P$	${}^yR {}^yR (RR)_N {}^yR$
${}^xP {}^xP (RR)_N {}^yR$	${}^xP {}^yR {}^yR (RR)_N$	${}^yR {}^yR {}^yR (RR)_N$
${}^xP {}^yR (RR)_N {}^xP {}^P$	${}^yR {}^yR {}^xP (RR)_N$	
${}^yR {}^xP (RR)_N {}^xP {}^P$	${}^yR {}^xP {}^yR (RR)_N$	
${}^xP (RR)_N {}^xP {}^yR$	${}^yR {}^xP (RR)_N {}^yR$	
${}^yR (RR)_N {}^xP {}^xP {}^P$	${}^xP {}^yR (RR)_N {}^yR$	
${}^xP (RR)_N {}^yR {}^xP {}^P$	${}^yR {}^yR (RR)_N {}^xP {}^P$	
$(RR)_N {}^xP {}^xP {}^yR$	${}^xP (RR)_N {}^yR {}^yR$	
$(RR)_N {}^xP {}^yR {}^xP {}^P$	${}^yR (RR)_N {}^xP {}^yR$	
$(RR)_N {}^yR {}^xP {}^xP {}^P$	$(RR)_N {}^xP {}^yR {}^yR$	
	${}^yR (RR)_N {}^yR {}^xP {}^P$	
	$(RR)_N {}^yR {}^yR {}^xP {}^P$	

根据上述综合出的 5 自由度的串联分支添加到 1R 人体膝关节运动支链周围, 构造出能自对准膝关节轴线的生物融合式康复机构。如图 4、5 中仅列出了两种 5 自由度分支结构简单的机型。 R_K 表示膝关节运动支链。

图 4 ${}^x C^x R^x U^y P^y U^x x R^x U^y P^y R^x PS/R_K$ 生物融合膝关节康复机构

图 5 ${}^x R^x C^x U^y P^y U^x x R^x U^y P^y R^x RS/R_K$ 生物融合膝关节康复机构

2.2 运动分支是 4 自由度的膝关节康复机构

对 S_1^r 、 S_2^r 、 S_3^r 任意两个约束螺旋求反螺旋, 即可得到两种类型的运动分支, 分别对 S_1^r 、 S_3^r 和 S_2^r 、 S_3^r 两组约束螺旋求逆可得到 2T2R 运动分支, 对 S_1^r 、 S_2^r 求逆可得到 3T1R 运动分支。

例如对 S_1^r 、 S_3^r 求逆可得运动螺旋为

$$\begin{cases} S_{114} = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ S_{124} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ S_{134} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ S_{144} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (10)$$

通过对式(10)中的 4 个运动螺旋线性组合, 可以得到多种形式的 2T2R 运动螺旋系, 必须满足线性组合后的运动螺旋线性无关, 同理可以得到 3T1R 的多个运动支链, 根据要求可以添加的 4 自由度运动支链如表 3 所示。

表 3 四自由度的运动支链

2T2R 运动支链	3T1R 运动支链
${}^x U^y P^y R^y R$	${}^x P^k P^k P^y R$
${}^x P^x P^x R^y R$	${}^x P^z P^y C$
${}^x P^x C^y R$	${}^{xy} P^k P^y R^y R$
${}^x C^x P^y R$	${}^{xy} P^y R^k P^y R$
${}^x C^y R^y R$	${}^y C^x P^z P$
	${}^k P^y P^y R^y P$
	${}^x P^y C^y R$

把表 3 中 2T2R 运动支链里 x 向转动副替换成 z 向转动副, 即可得到与 S_2^r 、 S_3^r 互逆的 2T2R 运动支链。

上述综合出来的 4 自由度串联分支添加到 1R 人体膝关节运动支链周围, 构造出能自对准膝关节轴线的生物融合式康复机构, 如图 6 所示。

图 6 ${}^x U^y P^y R^y R / {}^z U^y P^y R^y R / R_K$ 生物融合膝关节康复机构

通过分析可知图 6 机构在运动过程, 和定平台固连的转动副轴线 S_1 、 S_2 方向始终不变, 去掉这两个冗余运动副, 机构同样能实现两平移一转动三个自由度, 此时机构变成 2RRR/ R_K , 机构分支自由度为 3, 下文将具体介绍三自由度的运动分支, 通过分析可知单纯的四自由度分支无法构成满足运动补偿条件的串联分支, 因为有些运动副在机构空间布局确定后被其他分支所约束。由于上文已经构造出 5 自由度的运动分支, 将 5 自由度和 4 自由度的运动分支组合布置在 1R 人体膝关节运动支链周围, 构造出能自对准膝关节轴线的生物融合式康复机构。如图 7 所示, 在定平台中心点建立直角坐标系 $oxyz$, 图 7 中的 URR 分支限制了动平台 y 轴方向的移动和 x 方向的转动, URU 分支限制了 z 方向的转动, URR/URU 并联机构限制了 y 轴方向的平移和 xz 方向的转动, 只存在两平移一转动三个自由度, 满足运动补偿需求。

图 7 ${}^z U^y P^y R^y R / {}^y U^x x R^x U^y P^y R_K$ 生物融合膝关节康复机构

2.3 运动分支是 3 自由度的膝关节康复机构

对 $\mathcal{S}_1^r$ 、 $\mathcal{S}_2^r$ 和 $\mathcal{S}_3^r$ 求逆可得到三自由度的运动分支

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{113} = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{123} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{133} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (11)$$

通过式(11)中 3 个运动螺旋的线性组合, 就可以得到许多满足约束条件的运动分支, 必须满足线性组合后的螺旋线性无关, 综合得到的 2T1R 运动分支构型可以表示为: ${}^yR^{xz}P^yR$ 、 ${}^yR^yR^yR$ 、 ${}^{xz}P^{xz}P^yR$ 、 ${}^{xz}P^yR^yR$ 、 ${}^{xz}P^yR^{xz}P$ 、 ${}^yR^{xz}P^{xz}P$ 、 ${}^yR^yR^{xz}P$ 。

根据上述综合出来的 3 自由度串联分支添加到 1R 人体膝关节运动支链周围, 构造出能自对准膝关节轴线的生物融合式康复机构。如图 8、9 所示。

图 8 $2^yR^yP^yR/R_K$ 生物融合膝关节康复机构

图 9 $2^yR^yR^yR/R_K$ 生物融合膝关节康复机构

2.4 CRU/RRR/ R_K 膝关节康复机构自由度分析

以 CRU/RRR/ R_K 康复机构为例, 对本文综合的机构进行分析, 以验证综合方法的正确性。

根据螺旋理论分析了 CRU/RRR/ R_K 康复机构自由度, 如图 10 所示在定平台中心处建立基坐标系 $M-XYZ$, $\mathcal{S}_{12}$ 与 X 轴平行, $\mathcal{S}_{11}$ 与 Y 轴平行, 驱动副按照运动补偿条件(2)进行布置。CRU 分支的运动螺旋 $\mathcal{S}_{12}$ 、 $\mathcal{S}_{13}$ 、 $\mathcal{S}_{14}$ 相互平行, RRR 分支转动副方向相

互平行, 膝关节处运动副轴线方向沿着 Y 轴方向。

图 10 CRU/RRR/ R_K 膝关节康复机构

按照图 10 所示的运动螺旋分布图, 可以写出 CRU/RRR/ R_K 康复机构三个分支运动副在基坐标系 $M-XYZ$ 中的运动螺旋, 利用螺旋互易积计算反螺旋的方法, 可以求得各个分支的约束反螺旋。

CRU 分支运动螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{11} = (0 \ 1 \ 0; -Z_{A1} \ 0 \ X_{A1}) \\ \mathcal{S}_{12} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ Z_{A1} \ -Y_{A1}) \\ \mathcal{S}_{13} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ -Z_{B1} \ Y_{B1}) \\ \mathcal{S}_{14} = (1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ -Y_{D1}) \\ \mathcal{S}_{15} = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (12)$$

CRU 分支约束螺旋系为

$$\mathcal{S}^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \quad (13)$$

RRR 分支运动螺旋系如下

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{21} = (0 \ 1 \ 0; -Z_{A2} \ 0 \ X_{A2}) \\ \mathcal{S}_{22} = (0 \ 1 \ 0; -Z_{B2} \ 0 \ X_{B2}) \\ \mathcal{S}_{23} = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ X_{D2}) \end{cases} \quad (14)$$

RRR 分支反螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{21}^r = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{22}^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{23}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \end{cases} \quad (15)$$

膝关节分支运动螺旋系为

$$\mathcal{S}_3 = (0 \ 1 \ 0; -Z_{B3} \ 0 \ X_{B3}) \quad (16)$$

膝关节分支约束螺旋系为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_{31}^r = (0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{32}^r = (0 \ 0 \ 0; 1 \ 0 \ 0) \\ \mathcal{S}_{33}^r = (0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1) \\ \mathcal{S}_{34}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ Z_{B3} \ 0) \\ \mathcal{S}_{35}^r = (0 \ 0 \ 1; 0 \ -X_{B3} \ 0) \end{cases} \quad (17)$$

$\mathcal{S}_{ij}$ 表示此机构运动螺旋($i=1, 2, 3$ 表示分支序号, $j=1, 2, 3, 4, 5$ 表示运动副序号), X_{mk} 、 Y_{mk} 、 Z_{mk} ($m=A, B, D$ 表示运动副中心点代号, $k=1, 2, 3$ 表示分支序号)表示各分支运动副中心点的位置。

不考虑公共约束的情况下机构的阶数取 6, CRU 分支、RRR 分支和膝关节分支共受到 9 个约束螺旋, 这三个运动分支受到的约束螺旋的最大线性无关数是 5, 整个机构存在 4 个冗余约束。

用修正的 G-K 公式计算机构的自由度

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v = 6(6 - 7 - 1) + 9 + 4 = 1$$

式中 M ——机构的自由度;

n ——包括机架构件的数目;

g ——运动副的数目;

f_i ——第 i 个运动副的自由度;

v ——多环并联机构在不考虑公共约束的情况下冗余约束的数目。

可以验证膝关节康复机构的动平台存在 1 个绕着 Y 轴方向转动的自由度。

动平台自由度与人体膝关节自由度相同, 如式 (16) 所示, 始终表示一个沿着人体矢状面法线方向转动, 位置不断变化的单自由度运动, 因此该机构是一个全周自由度机构。

2.5 CRU/RRR/R_K 康复机构仿真验证

为了验证型综合出来的生物融合式膝关节康复机构运动补偿的正确性, 用仿真软件对康复机构进行运动仿真, 如图 11 所示, 在定平台中心点建立直角坐标系 $OXYZ$, x_2 、 z_2 分别表示动平台中心点与定坐标系原点 O 之间距离在 X 、 Z 方向的投影, 同理, x_4 、 z_4 分别表示另一组股骨关节面尺寸不同的膝关节模型的动平台中心点与定坐标系原点 O 之间距离在 X 、 Z 方向的投影, θ 表示膝关节的转角。

图 11 康复机构运动仿真模型

在仿真过程中康复机构对两组不同尺寸的人体膝关节模型在 0 到 60° 的运动过程中任意取 6 个角

度, 测量动平台中心点的位置坐标, 与理论计算的结果进行比较, 理论值采用式 (4)、(5) 计算出动平台中心点的位置坐标。如表 4、5 所示, x_1 、 z_1 和 x_3 、 z_3 分别表示不同尺寸的人体膝关节模型计算的理论值, 按照人机工程学设置理论模型结构参数 $a_1=244.98$ mm, $a_2=246.62$ mm, $b_1=233.98$ mm, $b_2=236.02$ mm, $h_1=177$ mm。两种算例仿真时机构的结构参数 $b_3=233.98$ mm, $b_4=236.02$ mm, $h_2=177$ mm, h ($i=1, 2$) 分别表示理论和仿真模型中股骨关节面中心到定平台中心点的距离, a_i 、 b_i ($i=1, 2$) 分别表示图 2 中不同尺寸的膝关节理论模型中以 o_1 为椭圆圆心的动平台中心点走出的椭圆运动轨迹的长轴和短轴半径, b_i ($i=3, 4$) 分别表示运动算例 1、2 仿真过程中动平台与定平台平行时, 股骨关节面中心到动平台中心点的距离。

表 4 运动算例 1 验证

膝关节转角 $\theta/(^{\circ})$	理论计算/mm		仿真算例/mm	
	x_1	z_1	x_2	z_2
10	40.68	407.72	40.68	407.72
20.07	80.70	397.88	80.70	397.88
30.6	120.44	380.65	120.44	380.65
44.8	168.45	346.63	168.45	346.63
53	192.1	321.78	192.1	321.78
60	209.40	297.90	209.40	297.90

表 5 运动算例 2 验证

膝关节转角 $\theta/(^{\circ})$	理论计算/mm		仿真算例/mm	
	x_3	z_3	x_4	z_4
10	41.04	409.73	41.04	409.73
20.07	81.39	399.79	81.39	399.79
30.6	121.48	382.40	121.48	382.40
44.8	169.89	348.08	169.89	348.08
53	193.76	323.01	193.76	323.01
60	211.17	298.92	211.17	298.92

通过表 4、5 两组数据分别对比发现, 理论值和仿真值完全一致, 验证了膝关节康复机构综合的合理性。

3 结论

(1) 建立了具有变轴线转动 1R 人体膝关节三维模型, 以此 1R 膝关节模型为基础, 提出一种膝关节轴线与外骨骼轴线自动对准的运动补偿条件和一类生物融合式膝关节康复机构型综合的新方法。

(2) 基于螺旋理论构建符合运动补偿条件的生物融合式膝关节康复机构的基本模型; 最后以一种生物

融合式膝关节康复机构为研究对象, 用修正的 G-K 公式计算了生物融合式膝关节康复机构自由度, 并用运动学仿真软件验证了运动补偿的正确性, 为进一步综合生物融合式膝关节康复机构提供新的思路。

参 考 文 献

- [1] ZHU Lili, WANG Guangxin, LI Dan. Design of CPM training machine of recovery for knee joints[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2567(734): 161-164.
- [2] LYU Mingxing, CHEN Weihai, DING Xilun, et al. Design of a biologically inspired lower limb exoskeleton for human gait rehabilitation[J]. The Review of Scientific Instruments, 2016, 87(10): 289-304.
- [3] HUANG Zhen, LI Qinchuan. Type synthesis of symmetrical lower-mobility parallel mechanisms using the constraint-synthesis method[J]. International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1): 59-79.
- [4] SHEN Huiping, YANG Tingli, MA Lyuzhong. Synthesis and structure analysis of kinematic structures of 6-DOF parallel robotic mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 40(10): 1164-1180.
- [5] GOGU G, Structural synthesis of fully-isotropic translational parallel robots via theory of linear transformations[J]. European Journal of Mechanics / A Solids, 2004, 23(6): 1021-1039.
- [6] KONG Xianwen, JIN Yan. Type synthesis of 3-DOF multi-mode translational/spherical parallel mechanisms with lockable joints[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96(2): 323-333.
- [7] HE Jun, GAO Feng. Type synthesis for bionic quadruped walking robots[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(4): 527-538.
- [8] LI Qinchuan, HUANG Zhen, HERVE J M. Type synthesis of 3R2T 5-DOF parallel mechanisms using the lie group of displacements[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation: A Publication of The IEEE Robotics and Automation Society, 2004, 20(2): 173-180.
- [9] 李仕华, 田志立, 王子义, 等. 具有连续转轴的对称 2R1T 三自由度并联机构型综合[J]. 机械工程学报, 2017, 53(23): 74-82.
- LI Shihua, TIAN Zhili, WANG Ziyi, et al. Synthesis of symmetric 2R1T three-degree-of-freedom parallel mechanism with continuous rotation axis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(23): 74-82.
- [10] 杨彦东, 甄春江, 侯雨雷, 等. 对称单自由度螺旋运动并联机构型综合[J]. 机械工程学报, 2019, 55(3): 27-33.
- YANG Yandong, QI Chunjiang, HOU Yulei, et al. Synthesis of symmetric single degree of freedom spiral motion parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 27-33.
- [11] 张彦斌, 刘宏昭, 吴鑫. 基于互易螺旋理论的无奇异完全各向同性移动并联机构型综合[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 83-88.
- ZHANG Yanbin, LIU Hongzhao, WU Xin. Synthesis of singularly complete isotropic mobile parallel mechanism based on reciprocal spiral theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 83-88.
- [12] 赵延治, 曹亚超, 梁博文, 等. 一类恒定雅可比矩阵移动并联机构的判定与综合[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 101-107.
- ZHAO Yanzhi, CAO Yachao, LIANG Bowen, et al. Judgement and synthesis of a class of constant jacobian matrix moving parallel mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 101-107.
- [13] ZENG Daxing, HUANG Zhen. Type synthesis of the rotational decoupled parallel mechanism based on screw theory[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(4): 998-1004.
- [14] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- HUANG Zhen, ZHAO Yongsheng, ZHAO Tieshi. Advanced spatital mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [15] IWAKI H, PINSKEROVA V, FREEMAN M A. Tibiofemoral movement 1: The shapes and relative movements of the femur and tibia in the unloaded cadaver knee[J]. Journal of Bone & Joint Surgery-british Volume, 2000, 82(8): 1189-1195.
- [16] LEE K M, GUO Jiajie. Kinematic and dynamic analysis of an anatomically based knee joint[J]. Journal of Biomechanics, 2010, 43(7): 1231-1236.

作者简介: 王森, 男, 1995 年出生。主要研究方向为膝关节康复机器人的设计分析。

E-mail: 2743824384@qq.com

李艳文(通信作者), 女, 1966 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机器人技术及应用研究。

E-mail: ywl@ysu.edu.cn

陈子明, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为空间少自由度并联机构的设计与分析理论。

E-mail: chenzm@ysu.edu.cn

宋加涛, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为串联机械臂的设计与分析。

E-mail: 2814438520@qq.com

梁文龙, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为下肢康复机器人的设计分析。

E-mail: 2831984347@qq.com