第 18 卷　第 34 期　2018 年 12 月
1671—1815(2018)034-0196-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 18　No. 34　Dec. 2018
ⓒ　2018　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:杨凯歌, 钟佩思, 郑　义, 等. 基于迭代学习控制算法的下肢外骨骼机器人跟随特性[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 196—201

Yang Kaige, Zhong Peisi, Zheng Yi, et al. Follow-up characteristics of lower limb exoskeleton robot based on iterative learning control algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 196—201

自动化技术、计算机技术

基于迭代学习控制算法的下肢外骨骼机器人跟随特性

杨凯歌[1]　钟佩思[1*]　郑　义[1,2]　倪　伟[1]　刘　梅[1]

(山东科技大学先进制造技术研究中心[1],青岛 266590;青岛黄海学院机电工程学院[2],青岛 266427)

摘　要　目前下肢外骨骼机器人存在的运动控制算法追踪人体髋关节和膝关节期望轨迹时存在误差,从而导致人机系统随动性能差。因此,提出迭代学习控制算法追踪人体髋关节和膝关节期望轨迹。首先,结合人体下肢结构分析,建立下肢外骨骼机器人动力学模型;其次,基于迭代学习控制算法建立下肢外骨骼机器人随动控制模型;最后,利用 Matlab 软件设计指数变增益闭环 D 型运动控制系统,分析收敛速度与谱半径的关系,追踪得到人体下肢髋关节和膝关节期望轨迹。仿真结果表明该算法能够有效提高下肢外骨骼机器人步态轨迹跟踪精度,提升人机系统随动性能。

关键词　下肢外骨骼机器人　　迭代学习控制算法　　运动控制系统　　步态轨迹跟踪精度

中图法分类号　TP242.6;　　**文献标志码**　A

随着步入 21 世纪,人口老龄化越来越严重,一些疾病和损伤导致人体下肢移动功能性障碍。下肢助力外骨骼机器人是一种可穿戴式人机一体化装备,通过人体下肢的引导,完成各种高强度运动。该装备为人类行走提供助力,增强人类行走能力和速度,缓解人类在高负载和长时间行走情况下出现的疲劳感。

运动控制算法是外骨骼机器人控制系统研究的核心部分,识别穿戴者步态信息并检测其运动意图是控制算法的核心技术。加州伯克利大学研究团队采用位置控制和灵敏度放大控制的混合控制算法研制出下肢外骨骼机器人(BLEEX)[1];日本筑波大学研制的外骨骼机器人(HAL-5)通过采集人体皮肤上的生物电流判断穿戴者的运动意图,控制外骨骼机器人随穿戴者一起运动[2,3];浙江大学流体传动与控制国家重点实验室研发的下肢康复外骨骼利用模糊逻辑的分析决策方式识别穿戴者运动意图[4];上海交通大学把模糊自适应 PID(proportion integral derivative)控制算法应用到混联下肢外骨骼机器人,增加了人体的负载能力[5]。

基于下肢外骨骼机器人跟随人体运动时随动性能较差,迭代学习控制算法适合在有限时间重复工作,能够实现对期望轨迹跟踪。因此,本文基于迭代学习控制算法提出下肢外骨骼机器人随动控制模型;通过人体下肢结构分析,建立下肢外骨骼机器人动力学模型;采用迭代学习控制算法设计运动控制系统并进行收敛性分析;利用 Matlab 软件对人体髋关节和膝关节的期望步态轨迹进行追踪,验证迭代学习控制算法的优越性,展示了较好的应用价值。

1　下肢外骨骼机器人动力学建模

生物力学仿真及实验研究显示,人体在矢状面内运动消耗的功率相当于额状面和水平面之和[6]。从控制观点看,机器人属于多变量非线性的自动控制系统,每个控制任务本身就是一个动力学系统。机器人动力学是机器人技术研究的基础,研究机器人动力学问题就是为更好地解决控制问题做铺垫。

1.1　人体下肢结构分析

根据人体的正常运动空间,人体下肢运动自由

2018 年 6 月 4 日收到　　山东省重点研发计划(2018GGX106001)、山东省高等学校科学技术计划(J18KA009)、山东省高等学校科学技术计划(J16LB58)和山东科技大学研究生科技创新项目(SDKDYC180334、SDKDYC180329)资助

第一作者简介:杨凯歌(1993—),男,汉族,河南安阳人,硕士研究生。研究方向:数控与机器人技术。E-mail:2541090225@qq.com。

*通信作者简介:钟佩思(1966—),男,汉族,山东莱阳人,博士,教授,博士研究生导师。研究方向:现代设计方法、并行工程与虚拟样机、数控与机器人技术。E-mail:pszhong@163.com。

度包括:大腿的屈伸、内旋、外旋、内收和外展;小腿的屈伸;脚部的屈伸、内旋、外旋、内收和外展。步行作为人类运动的主要形式,通过双足的交替支撑来完成身体的移动,在人类行走过程中,规定从一侧足跟着地开始到同侧足跟再次着地结束为一个完整的步态周期[7]。如图 1 所示为人体步态周期相位图,对于单侧下肢,一个步态周期可以分为支撑相和摆动相两个阶段。其中支撑相占整个运动周期的 60%,期间包含单足支撑状态和双足支撑状态;摆动相占整个摆动周期的 40%。因此,在人机耦合系统中,处于单足支撑状态的髋关节和膝关节的旋转带动大腿、小腿和脚部的摆动,实现人体下肢姿态运动。

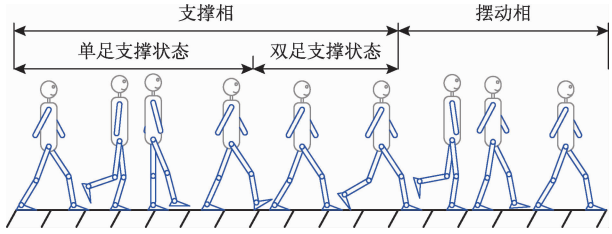

图 1　人体步态周期相位图

Fig. 1　Cycle phase diagram of human gait

1.2　下肢外骨骼机器人动力学模型

下肢外骨骼机器人的动力学方程主要描述机器人运动和控制力的关系,行走姿态的运动主要发生在矢状面上,一个完整的支撑相分为单足支撑状态和双足支撑状态。单足支撑状态阶段摆动腿髋关节和膝关节的驱动力矩比双足支撑状态相应的关节力矩大;由于踝关节主要在水平面上调整人体的运动方向,在矢状面上提供的关节驱动力矩较小。因此,下肢外骨骼机器人摆动腿在矢状面内可简化成如图 2 所示的摆动腿模型。

假设连杆质量都集中在连杆的中心位置,对外骨骼机器人简化的摆动腿模型进行分析,采用 Lagrange 方法将人机系统作为研究对象,分析人机系统动能和势能的变化情况,得到动力学方程:

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{T}_{\alpha} \tag{1}$$

式(1)中,定义关节角位移量 $\boldsymbol{q} = \begin{pmatrix}\theta_1\\ \theta_2\end{pmatrix}$;定义惯性力矩阵 $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) = \begin{pmatrix}a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22}\end{pmatrix}$,$a_{12} = a_{21} = 0.25\,m_2l_2^2 + 0.5\,m_2l_1l_2\cos\theta_2$、$a_{11} = (0.25\,m_1 + m_2)l_1^2 + 0.25\,m_2l_2^2 + m_2l_1l_2\cos\theta_2$、$a_{22} = 0.25\,m_2l_2^2$;定义离心力和哥氏力矩阵 $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) = \begin{pmatrix}c_{11} & c_{12}\\ c_{21} & c_{22}\end{pmatrix}$,$c_{11} = -m_2l_1l_2\sin\theta_2\dot{\theta}_2$、$c_{12} = -0.5\,m_2l_1l_2\sin\theta_2\dot{\theta}_2$、$c_{21} = 0.5\,m_2l_1l_2\sin\theta_2\dot{\theta}_1$、$c_{22} = m_2l_1l_2\sin\theta_2\dot{\theta}_1$;定义重力向量 $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) = \begin{pmatrix}b_1\\ b_2\end{pmatrix}$,$b_1 = (0.5\,m_1 + m_2)gl_1\cos\theta_1 + 0.5\,m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2)$、$b_2 = 0.5m_2gl_2\cos(\theta_1 + \theta_2)$;定义控制力矩 $\boldsymbol{\tau} \in R^n$;定义各种误差和扰动 $\boldsymbol{T}_{\alpha} \in R^n$;其中,$m_1$、$m_2$ 分别表示人机系统中大腿和小腿的质量,l_1、l_2 分别表示人机系统中大腿和小腿的长度,θ_1、θ_2 分别表示髋关节和膝关节运动角度。

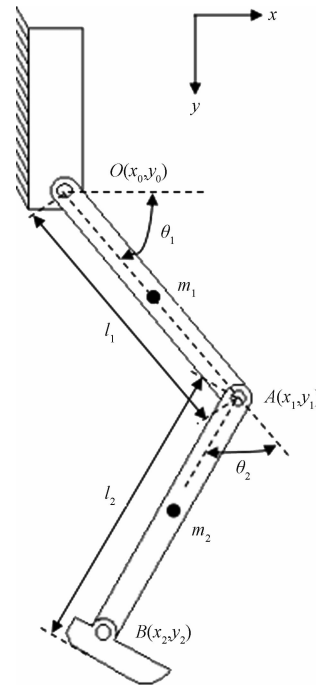

图 2　摆动腿模型

Fig. 2　The swing leg model

2　下肢外骨骼机器人跟随控制

外骨骼机器人具有高度非线性、强耦合和时变性等动力学特点,在设计控制器时,由于数学模型的不确定性,设计出的控制器可能会导致系统性能不稳定[8]。迭代学习控制的特点是学习算法简单,且不依赖被控系统的详细模型,适用有限时间区间上具有重复运动性质的被控对象,在建立下肢外骨骼机器人动力学模型的基础上,将跟踪误差调整为学习信号,改善某种控制目标,实现对期望轨迹的跟踪[8,9]。

文献[10]采用高速相机进行临床步态实验分析,得到如图 3 所示下肢外骨骼机器人在矢状面上髋关节和膝关节的期望关节运动曲线。通过 Matlab2014b 中的 cftool 数据拟合工具箱,定义下肢外骨骼机器人在髋关节和膝关节期望的运动轨迹为

$$\begin{cases} q_{\mathrm{hip}}(t) = 22.35\sin(4.614t - 0.659) + 8.25 \\ q_{\mathrm{knee}}(t) = 42.51\sin(2.726t - 0.664) + \\ \qquad\qquad 31.49\sin(5.976t + 0.957) \end{cases} \tag{2}$$

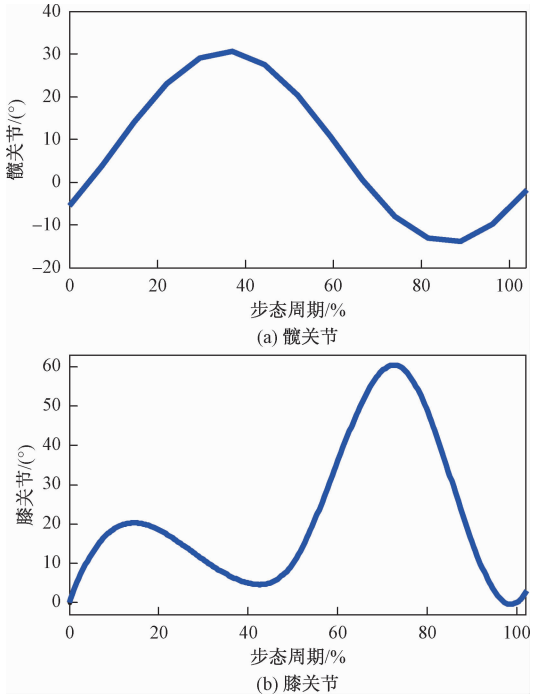

图 3 下肢外骨骼机器人在矢状面上期望关节轨迹

Fig. 3 Desired joint trajectory on sagittal plane for lower limb exoskeleton robot

式(2)中,$q_{\text{hip}}(t)$ 和 $q_{\text{knee}}(t)$ 分别表示髋关节和膝关节期望运动角度,t 表示运动时间。

2.1 迭代学习控制基本原理

运用迭代学习控制技术设计控制器,需要获得受控对象的误差或误差倒数信号,在这种控制技术中,迭代学习总要从某初始点开始,几乎所有的收敛性证明都要求初始条件是相同的[11,12]。在设计迭代学习系统时,为保证系统收敛性,往往要求每次迭代开始时刻的迭代初值与期望初值一致,即满足初始条件:

$$\boldsymbol{x}_k(0) = \boldsymbol{x}_{\text{d}}(0); \quad k = 0,1,\cdots \tag{3}$$

式(3)中,$\boldsymbol{x}_k(0)$ 表示迭代初值,$\boldsymbol{x}_{\text{d}}(0)$ 表示期望初值。

在学习开始时,系统的初始状态为 $\boldsymbol{x}_0(t)$。通过学习控制律设计 $\boldsymbol{u}_{k+1}(t)$,使第 $k+1$ 次运动误差 $\boldsymbol{e}_{k+1}(t)$ 减少。如图 4 所示为 D 型学习律系统结构图,其控制方法是:第 $k+1$ 次控制 $\boldsymbol{u}_{k+1}(t)$ 等于第 k 次控制 $\boldsymbol{u}_k(t)$ 加上第 k 次输出误差 $\boldsymbol{e}_k(t)$ 的校正项[13],其迭代学习控制律为

$$\boldsymbol{u}_{k+1}(t) = \boldsymbol{u}_k(t) + \lambda(t)\boldsymbol{\Gamma}\dot{\boldsymbol{e}}_k(t) \tag{4}$$

式(4)中,$\boldsymbol{u}_{k+1}(t)$ 表示第 $k+1$ 次控制,$t \in [0,T]$,k 表示迭代次数,$\lambda(t) > 1$,$\boldsymbol{\Gamma}$ 表示学习增益系数。

设具有重复运动性质被控系统的动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_k(k) = \boldsymbol{f}[t,\boldsymbol{x}(t)] + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t) \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}(t) \end{cases} \tag{5}$$

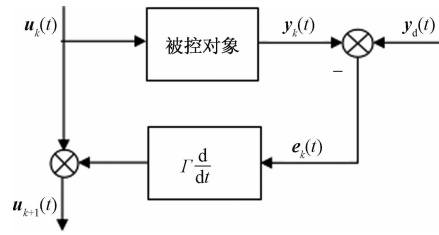

图 4 D 型学习律系统结构图

Fig. 4 The structure diagram of D-type learning law system

式(5)中,$\boldsymbol{x}$ 表示系统的状态;$\boldsymbol{y}$ 表示系统的输出;$\boldsymbol{u}$ 表示系统的输入变量;$\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 表示适当维度的向量。

给定期望输出 $\boldsymbol{y}_{\text{d}}(t)$ 和初始状态 $\boldsymbol{x}_k(0)$,要求在给定的时间 $t \in [0,T]$ 内,按照一定的学习控制算法,通过多次重复运行,使控制输入 $\boldsymbol{u}_k(t) \to \boldsymbol{u}_{\text{d}}(t)$,而系统输出 $\boldsymbol{y}_k(t) \to \boldsymbol{y}_{\text{d}}(t)$。

第 k 次运行时,式(5)表示为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_k(k) = \boldsymbol{f}[t,\boldsymbol{x}_k(t)] + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}_k(t) \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{x}_k(t) \end{cases} \tag{6}$$

2.2 运动控制系统设计

由式(1)可以得到下肢外骨骼机器人运动控制方程为[13,14]

$$\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{M}[q(t)]\ddot{q}(t) + \boldsymbol{C}[q(t),\dot{q}(t)]\dot{q}(t) + \boldsymbol{G}[q(t)] + \boldsymbol{T}_{\alpha} \tag{7}$$

式(7)满足 Lipschitz 条件,即存在 $P > 0$,使得 $\| \boldsymbol{f}(t,\boldsymbol{x}_1) - \boldsymbol{f}(t,\boldsymbol{x}_2) \| \leqslant P \| \boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2 \|$,$\forall \boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2 \in R^n$;每次运行时的初始状态误差 $\{\delta \boldsymbol{x}_k(0)\}$ 为收敛到 0 的序列;存在唯一的理想控制 $\boldsymbol{u}_{\text{d}}(t)$,使得系统的输出为期望值;$\boldsymbol{C}(t)$ 存在,且 $\boldsymbol{B}(t)$、$\boldsymbol{C}(t)$ 有界;$\boldsymbol{I} + \boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{B}(t)$ 存在逆矩阵。

则运动控制系统跟踪误差为

$$\boldsymbol{e}_k(t) = \boldsymbol{y}_{\text{d}}(t) - \boldsymbol{y}_k(t) \tag{8}$$

式(8)中,$\boldsymbol{y}_k(t)$ 表示控制输出,$\boldsymbol{y}_{\text{d}}(t)$ 表示期望输出。

针对下肢外骨骼机器人运动控制方程(7),采取如式(9)所示的一种指数变增益闭环 D 型迭代学习控制率,控制目标为满足 Lipschitz 条件的同时,在有限时间区域内使系统在任意初始状态下能够输出与期望轨迹相同的轨迹。

$$\boldsymbol{u}_{k+1}(t) = \boldsymbol{u}_k(t) + \lambda(t)\boldsymbol{\Gamma}[\dot{\boldsymbol{y}}_{\text{d}}(t) - \dot{\boldsymbol{y}}_{k+1}(t)] \tag{9}$$

则对任何给定初始控制 $\boldsymbol{u}_0(t)$ 及每次运行初始状态 $\boldsymbol{x}_k(0)$,基于迭代学习控制所输出轨迹皆收敛到 $x_{\text{d}}(t)$、$\boldsymbol{y}_{\text{d}}(t)$、$\boldsymbol{u}_{\text{d}}(t)$。因此,定义指数变增益闭环 D 型迭代学习控制率的谱半径为

$$\rho = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{C}(t)\boldsymbol{B}(t)]^{-1} \tag{10}$$

式(10)中,$\boldsymbol{I}$ 表示单位矩阵,$\boldsymbol{C}(t) = \begin{bmatrix} q_{\text{hip}}(t) \\ q_{\text{knee}}(t) \end{bmatrix}$,

$\boldsymbol{B}(t) = -\boldsymbol{M}[q(t)]^{-1}$。

下肢外骨骼机器人的控制任务是跟踪重复运动步态轨迹的期望轨迹,每次迭代周期完成后,下肢外骨骼机器人恢复初始位置,通过学习控制律设计 $\boldsymbol{u}_k(t)$,使第 k 次的运动误差 $\boldsymbol{e}_k(t)$ 减少。而学习效率的收敛性由控制律的谱半径决定,即学习效率的收敛性与谱半径成反比,且指数变增益闭环 D 型迭代学习控制率收敛性的充要条件为谱半径 $\rho<1$。如图 5 所示为闭环 D 型控制器谱半径,其中分别取学习增益系数为 50、100 和 120,从图 5 中得知学习增益系数取 100 时的谱半径相比其他两个增益系数的谱半径较低,收敛速度较快。

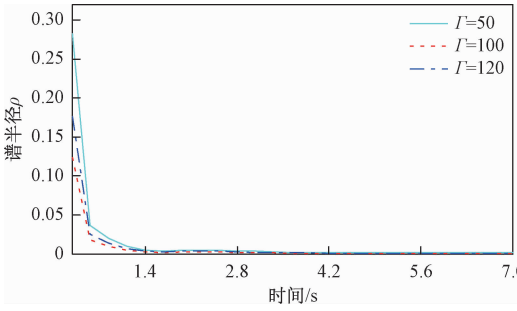

图 5　闭环 D 型控制器谱半径

Fig. 5　The spectral radius of closed-loop D-type controller

从图 5 中能够明显看出,当指数变增益闭环 D 型迭代学习控制率中学习增益系数取 100 时,经过 1 个周期的迭代学习,谱半径迅速下降,对应的收敛速度增加,从第 3 个迭代学习周期开始,谱半径达到最小,相应的收敛速度也达到最快,且谱半径在整个运动过程中 $\rho<0.14\ll1$ 恒成立,同时,运动控制系统随着运动时间增加,收敛性提升。在指数变增益闭环 D 型迭代学习控制率的基础上,影响运动控制系统收敛速度的谱半径随着时间 t 的增加而降低,而迭代学习的收敛速度与谱半径成反比关系。因此,迭代学习收敛速度逐渐增加,从第 3 个迭代周期开始,谱半径最小,收敛速度达到最快,实现人机系统一体化。

3　仿真结果分析

每个人的身高尺寸都存在差异,如要保证下肢外骨骼机器人满足人体的生理特点,就必须在设计中充分考虑到这一点。根据人机工程学测量的概率分布研究得出,中国成年人的下肢骨骼各部位尺寸与身高有直接的比例关系,以《中国成年人人体尺寸》中人体尺寸数据和《中国成年人人体质量参数》中人体各体段的相对质量分布为参考依据[15],得到了如表 1 所示人体下肢主要尺寸和质量。

表 1　人体下肢尺寸和质量

Table 1　The human lower limbs for dimensions and quality

体段名称	质量/kg	长度/mm
大腿	8.514	540.24
小腿	2.202	439.44

根据建立的下肢外骨骼机器人运动控制方程,考虑到外界产生的干扰,假设干扰项为 $\boldsymbol{\tau}_d=[0.3\sin t \quad 0.1(1-e^{-t})]^T$,取被控对象的初始状态为 $\boldsymbol{x}(0)=[-5 \quad 1 \quad 2 \quad 0]^T$。下肢外骨骼机器人髋关节和膝关节期望轨迹与基于迭代学习控制的实际跟踪轨迹结果如图 6 所示,由于机器人负载扰动等影响,在指数变增益闭环 D 型迭代学习控制率作用下,根据关节期望值与实际值的误差性能函数不断迭代修正权值,使髋关节和膝关节实际跟踪轨迹逐渐向期望轨迹靠近。

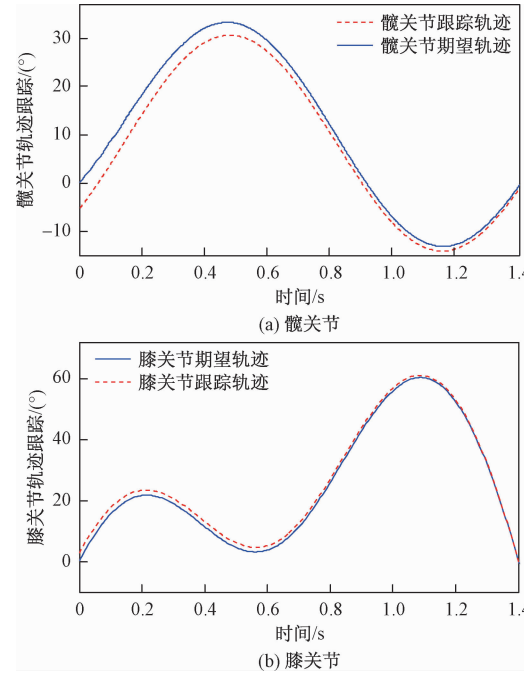

图 6　基于迭代学习控制的轨迹跟踪结果

Fig. 6　Trajectory tracking results based on iterative learning control

迭代学习控制过程中步态轨迹跟踪误差的变化,如图 7 所示。通过对比分析图 5 所示的闭环 D 型控制器谱半径,两者存在相同的结论,即在前 2 个迭代周期内,指数变增益闭环 D 型迭代学习控制率的谱半径迅速下降,对应的收敛速度增加,下肢外骨骼机器人轨迹跟踪误差逐渐降低,从第 3 个迭代学习周期,谱半径达到最小,相应的收敛速度达到最快,轨迹跟踪误差达到最低,使下肢外骨骼机器人能够快速、准确随同人体一起运动。而髋关节和膝关节初始阶段跟踪误差较大是由下肢外骨骼机器人随

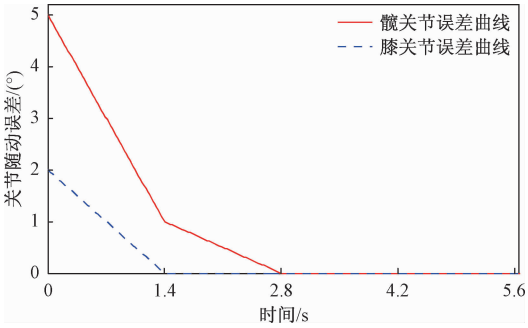

图 7 迭代学习控制过程中步态轨迹跟踪误差的变化

Fig. 7 Changes of gait trajectory tracking error in iterative learning control

同人体运动需有响应时间。

4 结论

在具有重复运动的人体行走姿态中,基于迭代学习控制算法建立下肢外骨骼机器人运动控制模型,利用 Matlab 软件设计指数变增益闭环 D 型运动控制系统,追踪得到人体下肢髋关节和膝关节期望轨迹。仿真结果表明,由于初始阶段存在随动响应时间,下肢外骨骼机器人随同人体运动的初期存在较大误差,经过 2 次迭代周期,其髋关节和膝关节期望轨迹跟踪误差基本消除,有效解决了下肢外骨骼机器人追踪人体髋关节和膝关节期望轨迹存在误差和随动性能差等问题。

参 考 文 献

1 Kazerooni H. The Berkeley lower extremity exoskeleton. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2006; 128(1): 9—15

2 Bandi F M, Patton A J. Introduction to the 2016 HAL white memorial lecture. Journal of Financial Econometrics, 2017; 15(3): 331—332

3 Matsuda M, Mataki Y. Immediate effects of a single session of robot-assisted gait training using Hybrid Assistive Limb (HAL) for cerebral palsy. Journal of Physical Therapy Science, 2018; 30(2): 207—212

4 张佳帆. 基于柔性外骨骼人机智能系统基础理论及应用技术研究. 杭州: 浙江大学, 2009
Zhang Jiafan. Exoskeleton based man machine intelligent system and its application. Hangzhou: Zhejiang University, 2009

5 潘大雷. 混联下肢外骨骼的步态规划与控制研究. 上海: 上海交通大学, 2015
Pan Dalei. Gait Planning and control research of a novel lower extremity exoskeleton with series-parallel mechanism. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015

6 曹志刚, 叶晓东, 王玉成, 等. 基于卡尔曼预测的外骨骼摆动腿随动控制研究. 科学技术与工程, 2016; 16(29): 96—102
Cao Zhigang, Ye Xiaodong, Wang Yucheng, *et al.* Fellow-up control of the exoskeleton's swing leg based on Kalman prediction. Science Technology and Engineering, 2016; 16(29): 96—102

7 陈梁军, 孔令成, 王玉成, 等. 人体步态分析与负重外骨骼机器人的动力学仿真. 科学技术与工程, 2016; 16(27): 45—49
Chen Liangjun, Kong Lingcheng, Wang Yucheng, *et al.* Human gait analysis and load-exoskeleton robot dynamic simulation. Science Technology and Engineering, 2016; 16(27): 45—49

8 赵汉滨, 赵子毅, 赵江海, 等. 一种下肢外骨骼机器人随动控制算法的研究. 计算机科学, 2017; 44(6A): 68—70
Zhao Hanbin, Zhao Ziyi, Zhao Jianghai, *et al.* Research on lower extremity exoskeleton robot servo control algorithm. Computer Science, 2017; 44(6A): 68—70

9 孙明轩, 严求真. 迭代学习控制系统的误差跟踪设计方法. 自动化学报, 2013; 39(3): 251—262
Sun Mingxuan, Yan Qiuzhen. Error tracking of iterative learning control systems. Acta Automatica Sinica, 2013; 39(3): 251—262

10 Yi L. Active disturbance rejection control based human gait tracking for lower extremity rehabilitation exoskeleton. ISA Transactions, 2017; 67(16): 389—397

11 曹 伟, 丛 望, 孙 明. 带有初态学习的指数变增益迭代学习控制. 系统工程与电子技术, 2012; 34(4): 773—777
Cao Wei, Cong Wang, Sun Ming. Iterative learning control of variable index gain with initial state study. Systems Engineering and Electronics, 2012; 34(4): 773—777

12 王洪斌, 王 艳. 带有初始误差的机械手轨迹跟踪的快速迭代学习控制. 系统工程理论与实践, 2011; 31(1): 165—171
Wang Hongbin, Wang Yan. Rapid ILC control of manipulator trajectory tracking with initial error. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011; 31(1): 165—171

13 于少娟. 迭代学习控制理论及应用. 北京: 机械工业出版社, 2005: 46—54
Yu Shaojuan. The theory and application of iterative learning control. Beijing: Machinery Industry Press, 2005: 46—54

14 孙胜琪, 赵志超, 尹红艳. 基于指数变增益迭代学习控制的机械臂轨迹跟踪研究. 沈阳大学学报(自然科学版), 2013; 25(3): 216—220
Sun Shengqi, Zhao Zhichao, Yin Hongyan. Manipulator trajectory tracking study based on iterative learning control of index variable gain. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2013; 25(3): 216—220

15 章心忆. 下肢外骨骼机器人的建模和控制策略研究. 南京: 南京理工大学, 2017
Zhang Xinyi. Study on modeling and control strategy of lower limb exoskeleton robot. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017

Follow-up Characteristics of Lower Limb Exoskeleton Robot Based on Iterative Learning Control Algorithm

YANG Kai-ge[1], ZHONG Pei-si[1*], ZHENG Yi[1,2], NI Wei[1], LIU Mei[1]

(Advanced Manufacturing Technology Center, Shandong University of Science and Technology[1], Qingdao 266590, China;
College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Huanghai University[2], Qingdao 266427, China)

[**Abstract**] Currently, motion control algorithms of lower limb exoskeleton robot had errors in tracking desired trajectories of human hip and knee joints, resulting in poor follow-up performance of the human-robot system. Therefore, iterative learning control algorithm is proposed to track the desired trajectory of human hip and knee joints. Firstly, considering the analysis of lower limb human structure, the dynamic model of lower limb exoskeleton robot was established. Secondly, the follow-up control model of lower limb exoskeleton robot was established, which based on iterative learning control algorithm. Finally, the exponential gain close-loop D type motion control system was designed, and the relationship between spectral radius and the convergence speed were analyzed. The hip and knee joints expected trajectory was tracked based on Matlab software. The simulation results show that this algorithm can effectively improve the accuracy of gait trajectory tracking, and the follow-up of human-robot system is promoted.

[**Key words**] lower limb exoskeleton robot　　iterative learning control algorithm　　motion control system　　the accuracy of gait trajectory tracking