

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.018

# 基于组合函数的脚踝康复机器人轨迹规划\*

廖志炜, 张俊, 卢宗兴, 姚立纲\*

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116)

**摘要:**针对所设计的混联式脚踝康复机器人的轨迹规划问题,对该机构并联部分的运动学逆解、轨迹规划方法、推杆输出控制进行了研究,提出了一种摆线函数和矩形函数相组合的康复轨迹,推导了其加速度、速度和位移的解析表达式。对比分析了该组合轨迹函数和传统摆线形式的轨迹函数对脚踝康复机构运动启停平稳性、最大速度、最大加速度以及刚性冲击的影响;最后,根据运动学逆解,计算了康复机构作跖屈/背屈运动时各推杆的输出量,并将其导入 ADAMS 进行了仿真实验,探讨了不同组合函数下各推杆的运动参数以及末端参考点的运动轨迹。研究表明:采用组合函数形式轨迹的新型混联式脚踝康复机器人能为患者提供一种启停平稳性较好,最大速度/加速度小、刚性冲击较小的康复运动。

**关键词:**脚踝康复;运动学逆解;轨迹规划;摆线函数;组合函数

中图分类号:TH113.2;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)03-0302-08

## Combined function based trajectory planning for a novel ankle rehabilitation robot

LIAO Zhi-wei, ZHANG Jun, LU Zong-xing, YAO Li-gang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** Aiming at the trajectory planning problems of the proposed hybrid ankle rehabilitation robot, the inverse kinematics, trajectory planning and the displacement of the pushrods were analyzed. A new trajectory for a novel patented ankle rehabilitation robot was proposed, which is composed of a cycloid function and a rectangular function. The kinetic characteristics i. e., the acceleration, the velocity and the displacement of the trajectory were derived and compared with those of a traditional cycloid trajectory. The influences of two types of trajectories on the stability, the maximum speed, the maximum acceleration and the rigid impact of the rehabilitation robot were compared. Finally, an inverse kinematic analysis was conducted to yield the displacements of three pushrods in the rehabilitation robot when it takes a planter/dorsal flexion motion. The displacements of three pushrods were imported into the ADAMS to analyze the parameters of the pushrods and the trajectory of the reference point. The results indicate that the proposed combined function based trajectory can provide a rehabilitation motion with better stability and less impact on the ankle.

**Key words:** ankle rehabilitation; inverse kinematics; trajectory planning; cycloid function; combined function

## 0 引言

作为人体中负重最大的关节,踝关节对人们的日常生活具有重要影响<sup>[1]</sup>。脚踝康复训练是指患者借

助辅助器材的帮助,在合理的工作空间内完成特定运动,进而促进受损部位的修复。为满足脚踝康复的需要,学术界近年来提出了多种脚踝康复装置。例如,Giorno 等<sup>[2]</sup>研制了一种可远程控制、带有虚拟现实并

收稿日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275092);福建省科技计划重大项目(2014H2004)

作者简介:廖志炜(1992-),男,福建龙岩人,硕士研究生,主要从事脚踝康复机器人方面的研究。E-mail:zhiweiliao@qq.com

通信联系人:姚立纲,男,教授,博士生导师。E-mail:ylgyao@fzu.edu.cn

能进行力反馈的踝关节康复机器人系统。DAI 等<sup>[3-4]</sup>研制了具有 3-SPS/SP 和 3-SPS/S 拓扑构型的少自由度踝关节康复机器人,可实现跖屈/背屈、内翻/外翻运动。Takemura 等<sup>[5]</sup>研制了一种基于 Stewart 结构的可穿戴式踝足康复训练机器人,其可通过调节 6 个气缸的压力来控制患者踝关节的运动。Xie 等人<sup>[6]</sup>开发了一种通过控制气动肌肉制动器(PMA)来实现康复运动的踝关节康复机器人。Stuart 等<sup>[7]</sup>提出了一种踝关节矫形康复器串联机构,可实现踝关节的背屈/跖屈运动和旋前/旋后运动。Yoon 等<sup>[8]</sup>提出了一种可重构的踝关节康复机器人,可满足不同运动特性的需求。刘颖超<sup>[9]</sup>提出了一种气动驱动的 6 自由度并联踝关节康复机器人,并对该机器人的运动学、动力学以及不同康复阶段的康复策略进行了研究。曾达幸等<sup>[10]</sup>提出了一种新型并联式解耦踝关节康复机构,并运用旋量理论对该机构进行了运动学及相关性能的分析。

对于康复机器人而言,其轨迹规划至关重要。规划合理的轨迹,可使康复装置具有较好的运动平稳性和较小的启停冲击,从而避免对患者造成二次伤害。学术界围绕机器人的轨迹规划,做了大量研究。其中,摆线加速度规律由正弦函数和一次项组成,在启、停阶段具有较好的平稳性,但其最大加速度值偏大,致使机构运动过程中的动量较大<sup>[11-12]</sup>。样条函数形式的加速度规律可保证机构运动的平稳性,可避免在启停阶段的抖动。常用的样条函数包括 3 次样条曲线、4 次样条曲线、B 样条曲线等<sup>[13-16]</sup>。另外,为避免单一函数的缺点,已有研究者推出了一系列组合函数的驱动模式,田西勇等<sup>[17]</sup>将两种不同频率的正弦函数组合,提出了一种加速度为组合正弦函数的轨迹规划方法。Ma 等<sup>[18]</sup>基于 H20 仿人机器人手臂,提出了一种由不同频率的摆线和余弦函数组成的轨迹规划方法。卢君宜等<sup>[19]</sup>提出了一种加速度为组合正弦函数的轨迹规划方法应用于农业采摘机器人,并与简单的摆线函数、样条函数进行对比。徐达等<sup>[20]</sup>提出将三次多项式与五次多项式进行组合应用于弹药装填机器人。综上所述,近年来组合函数轨迹规划方法的研究为解决单一函数存在的缺点提供了参考。但现有研究大多应用于一些工业用途的串联机器人,对于康复领域,特别是一些以并联机构为基础的康复机器人的应用相对较少,实际上,康复机器人的轨迹需要精心规划,合理的规划轨迹可以减少装置对患者的冲击,避免二次损伤,对于患者的康复极为重要。

鉴于此,本文以一种混联式脚踝康复机构为对象,提出一种采用摆线函数和矩形函数相组合的康复轨迹。

## 1 机构描述与运动学分析

### 1.1 机构描述

课题组前期研制的混联式脚踝康复机器人如图 1 所示。

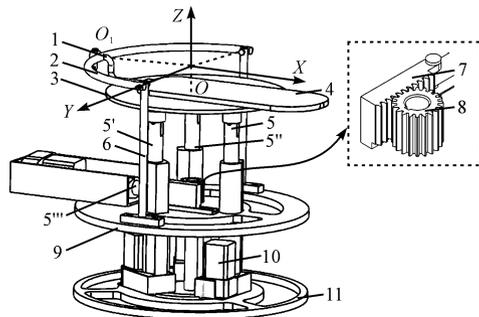


图1 混联式脚踝康复机器人

1—连接杆;2—摇杆;3—动平台;4—踏板;5—推杆;6—支撑杆;7—齿条;8—齿轮;9—旋转平台;10—步进电机;11—基台

由图 1 可知,该混联式脚踝康复机器人由连接杆(1)、摇杆(2)、动平台(3)、踏板(4)、推杆(5, 5', 5'')、支撑杆(6)、齿条(7)、齿轮(8)、旋转平台(9)、步进电机(10)以及基台(11)组成。其中,患者足底与机构踏板接触;推杆(5'')、齿条、齿轮、转动平台、支撑杆、摇杆、连接杆以及动平台组成该机构的串联部分;通过推杆(5'')的运动、齿条齿轮传动,带动转动平台绕 Z 轴旋转,实现脚踝的外展/内收运动。基座、3 个推杆(5, 5', 5'')、动平台、支撑杆、摇杆以及连接杆组成该机构的并联部分;通过 3 个推杆(5, 5', 5'')的上下运动带动动平台绕 X 轴、Y 轴旋转,实现脚踝的内翻/外翻运动和跖屈/背屈运动。

考虑到脚踝康复运动主要以跖屈/背屈、内翻/外翻运动为主,且该混联式脚踝康复机器人的串联部分较为简单,下文仅以该机器人的并联部分为对象,开展并联部分的运动学及轨迹规划研究。

### 1.2 运动学逆解

为方便建模和表述,下文将 3 个推杆(5, 5', 5'')分别用字母(A、B、C)来表示。并联机构的运动学逆解问题,就是已知动平台的位姿,求出推杆 A、B、C 的位移  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 。

通过对并联部分的结构分析,可给出该部分的机构运动简图如图 2 所示。

本研究在基台中心点 S 处建立固定坐标系 XYZ。

由图 2 可知,各推杆与动/基平台间构成封闭的

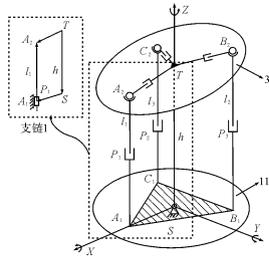


图 2 并联机构运动简图

$S, T$ —基台和动平台的中心点,两者间的距离设为  $h$ ;  $l_1, l_2, l_3$ —各推杆在基台和动平台间的长度

几何回路。如推杆  $A$  与动 / 基平台构成的几何封闭支链 1 为  $(S-A_1-A_2-T)$ ; 推杆  $B$  与动 / 基平台构成的几何封闭支链 2 为  $(S-B_1-B_2-T)$ 。推杆  $C$  与动 / 基平台构成的几何封闭支链 3 为  $(S-C_1-C_2-T)$ 。根据各支链几何关系,本文以支链 1 作为研究对象,来建立并联部分的运动学逆解模型。

由于该并联部分只实现脚踝绕  $X$  轴转动的内翻 / 外翻运动和绕  $Y$  轴转动的跖屈 / 背屈运动,需限制其绕  $Z$  轴的转动,即绕  $Z$  轴的转动角度  $\theta_3$  为 0。假定机构动平台依次绕  $Z, Y, X$  轴旋转完成运动,即:

$$\mathbf{R} = \text{Rot}(X, \theta_1) \text{Rot}(Y, \theta_2) \text{Rot}(Z, \theta_3) \quad (1)$$

展开得:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ \sin\theta_1 \sin\theta_2 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \cos\theta_2 \\ -\cos\theta_1 \sin\theta_2 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

以支链 1 为研究对象,可以得到:

$$\overrightarrow{\mathbf{TA}}_2 = \overrightarrow{\mathbf{TS}} + \overrightarrow{\mathbf{SA}}_1 + \overrightarrow{\mathbf{A}_1\mathbf{A}_2} \quad (3)$$

式中:  $\overrightarrow{\mathbf{TS}} = (0 \ 0 \ -h)^T$ ;  $\overrightarrow{\mathbf{SA}}_1 = (x_{A_1} \ y_{A_1} \ 0)^T$ ;

$\overrightarrow{\mathbf{A}_1\mathbf{A}_2} = (0 \ 0 \ P_1 + h)^T$ 。

于是有:  $\overrightarrow{\mathbf{TA}}_2 = (x_{A_1} \ y_{A_1} \ P_1)^T$ 。

另有:

$$\overrightarrow{\mathbf{TA}}_2 = \mathbf{R} \cdot \overrightarrow{\mathbf{TA}}_2' \quad (4)$$

式中:  $\overrightarrow{\mathbf{TA}}_2'$ —动平台连体坐标系下的向量。于是有:

$$\overrightarrow{\mathbf{TS}} + \overrightarrow{\mathbf{SA}}_1 + \overrightarrow{\mathbf{A}_1\mathbf{A}_2} = \mathbf{R} \cdot \overrightarrow{\mathbf{TA}}_2' \quad (5)$$

上式展开后并求解可得:

$$\begin{cases} x_{A_1} = x_{A_2} \cos\theta_2 \\ y_{A_1} = -x_{A_2} \sin\theta_1 \sin\theta_2 + y_{A_2} \cos\theta_1 \\ P_1 = (x_{A_1} \sin\theta_1 \cos\theta_2 - y_{A_1} \sin\theta_2) / \cos\theta_1 \cos\theta_2 \end{cases} \quad (6)$$

同理可得推杆  $B, C$  的位移与末端动平台位姿的关系式。最终可给出并联部分运动学逆解的通式如下:

$$P_i = \frac{x_{i_1} \sin\theta_1 \cos\theta_2 - y_{i_1} \sin\theta_2}{\cos\theta_1 \cos\theta_2} \quad (i = A, B, C) \quad (7)$$

由式(7)可知,各推杆的位移只与各推杆投影到基台上的点的坐标  $(x_{i_1} \ y_{i_1})$ 、动平台绕  $X$  轴和  $Y$  轴的转角  $\theta_1, \theta_2$  有关。

## 2 基于组合函数的轨迹规划

为了保证机构运动的平稳性,启停阶段不能有速度、加速度的冲击,且运动过程中位移、速度、加速度也应缓慢变化。与此同时,机构运动的最大加速度、最大速度、以及运动过程中的冲击都要尽可能地小。这样,才能保证机构运动过程中的动量不会过大,振动不会过高。为此,本文采用加速度为摆线函数和矩形函数相组合的运动规律。在此基础上,进一步研究组合函数不同的分段模式对系统位移、速度、加速度、冲击的影响规律。

本研究设定混联式脚踝康复机器人的启动和停止位姿时动平台的运动角度分别为  $\theta_b$  和  $\theta_e$ ,运动周期为  $T$ 。根据上述条件可知:

$$\begin{aligned} \theta(0) &= \theta_b, \theta'(0) = 0, \theta''(0) = 0 \\ \theta(T) &= \theta_e, \theta'(T) = 0, \theta''(T) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.1 基于摆线函数的轨迹规划

设该机构的运动周期  $T = 24$  s,运动时间为  $t$ 。根据该机构跖屈 / 背屈、内翻 / 外翻、外展 / 内收运动的特点,若不将运动角度的变化幅值  $U$  考虑在内,则  $\theta(t)$  的变化范围在  $[-1 \ 1]$ 。因运动曲线的周期性,只需考虑  $1/4$  周期的运动变化,由式(8)可以得到:

$$\begin{aligned} \theta(0) &= 0, \theta'(0) = 0, \theta''(0) = 0 \\ \theta\left(\frac{T}{4}\right) &= 1, \theta'\left(\frac{T}{4}\right) = 0, \theta''\left(\frac{T}{4}\right) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

故可假设加速度函数的表达形式如下:

$$a = K_1 \sin \frac{\pi}{3} t, 0 \leq t < 6 \quad (10)$$

根据分段函数中连续性的要求,可以依次得到速度函数、位移函数、冲击函数如下:

$$v = -\frac{3K_1}{\pi} \left( \cos \frac{\pi}{3} t - 1 \right), 0 \leq t < 6 \quad (11)$$

$$\theta = \frac{-9K_1}{\pi^2} \left( \sin \frac{\pi t}{3} - \frac{\pi t}{3} \right), 0 \leq t < 6 \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{\pi K_1}{3} \cos \frac{\pi t}{3}, 0 \leq t < 6 \quad (13)$$

代入边界条件,可得  $K_1 = \pi/18$ 。

### 2.2 基于组合函数的轨迹规划

矩形函数虽有较小的最大加速度,但其启停阶段有加速度的阶跃变化,而摆线函数的最大加速度虽较大,但却有较好的连续性。因此,笔者综

合两者的优点将加速度函数设计成一种组合分段函数,其中摆线函数的  $1/n$  周期由矩形函数的定

值  $K_2$  代替。

加速度函数的表达式:

$$a = \begin{cases} K_2 \sin \frac{8n\pi}{T(n-1)}t, & 0 \leq t < \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \\ K_2, & \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ K_2 \sin\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi}{n-1}\right), & \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \\ -K_2, & \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \\ -K_2 \sin\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi(n+1)}{n-1}\right), & \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{4} \end{cases} \quad (14)$$

速度函数的表达式:

$$v = \begin{cases} -K_2 \frac{T(n-1)}{8n\pi} \cos\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t\right) + K_2 \frac{T(n-1)}{8n\pi}, & 0 \leq t < \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \\ K_2 t + K_2 T \left[\frac{n-1}{8n\pi} - \frac{1}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right)\right], & \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ -K_2 \frac{T(n-1)}{8n\pi} \cos\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi}{n-1}\right) + K_2 T \left(\frac{1}{8n} + \frac{n-1}{8n\pi}\right), & \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \\ -K_2 t + K_2 T \left(\frac{3}{16} + \frac{1}{16n} + \frac{n-1}{8n\pi}\right), & \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \\ K_2 \frac{T(n-1)}{8n\pi} \cos\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi(n+1)}{n-1}\right) + K_2 \frac{T(n-1)}{8n\pi}, & \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{4} \end{cases} \quad (15)$$

位移函数表达式:

$$\theta = \begin{cases} -K_2 \left[\frac{T(n-1)}{8n\pi}\right]^2 \sin\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t\right) + K_2 \frac{T(n-1)}{8n\pi}t, & 0 \leq t < \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \\ \frac{1}{2}K_2 t^2 + K_2 \frac{T(n-1)}{8n\pi}t - \frac{K_2 T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right)t + \frac{1}{2}K_2 \left[\frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right)\right]^2 - K_2 \left[\frac{T(n-1)}{8n\pi}\right]^2, & \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ -K_2 \left[\frac{T(n-1)}{8n\pi}\right]^2 \sin\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi}{n-1}\right) + K_2 Tt \left(\frac{1}{8n} + \frac{n-1}{8n\pi}\right) - \frac{2K_2}{n} \left(\frac{T}{16}\right)^2, & \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \\ -\frac{1}{2}K_2 t^2 + K_2 Tt \left(\frac{3}{16} + \frac{1}{16n} + \frac{n-1}{8n\pi}\right) + K_2 \left(\frac{T}{16}\right)^2 \left(\frac{-9}{2} + \frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2}\right) + K_2 \left[\frac{T(n-1)}{8n\pi}\right]^2, & \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \\ K_2 \left[\frac{T(n-1)}{8n\pi}\right]^2 \sin\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi(n+1)}{n-1}\right) + K_2 Tt \frac{n-1}{8n\pi} + \frac{4K_2}{n} \left(\frac{T}{16}\right)^2, & \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{4} \end{cases} \quad (16)$$

冲击函数表达式:

$$\sigma = \begin{cases} K_2 \frac{8n\pi}{T(n-1)} \cos\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t\right), & 0 \leq t < \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \\ 0, & \frac{T}{16}\left(1 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \\ K_2 \frac{8n\pi}{T(n-1)} \cos\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi}{n-1}\right), & \frac{T}{16}\left(1 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \\ 0, & \frac{T}{16}\left(3 - \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \\ -K_2 \frac{8n\pi}{T(n-1)} \cos\left(\frac{8n\pi}{T(n-1)}t - \frac{\pi(n+1)}{n-1}\right), & \frac{T}{16}\left(3 + \frac{1}{n}\right) \leq t < \frac{T}{4} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{式中: } K_2 = \frac{64n\pi}{[2(n-1) + \pi]T^2} \circ$$

### 3 摆线与不同组合函数性能对比

本研究比较摆线函数与不同组合函数的位移、速

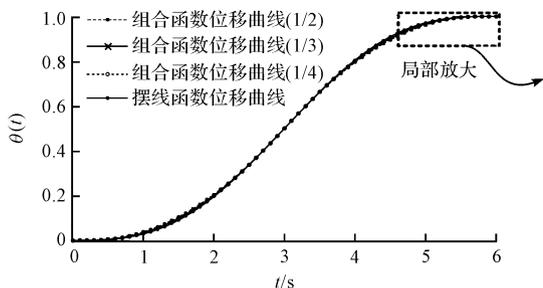


图3 位移对比图

如图3所示,从位移的变化曲线来看,几种轨迹规划的位移曲线在启停阶段变化缓慢,而在1/8周期处(3 s)快速增长。不同组合方式下的组合函数和摆线函数的位移曲线近似一致,随着n值的

度、加速度以及冲击函数曲线。由于曲线的对称性,下文只截取1/4周期的变化曲线进行对比分析,其结果如图3~6所示(其图例中,不同组合函数括号中的数表示其组合方式,例:“组合函数(1/n)”表示该组合函数有1/n周期是由矩形函数构成的)。

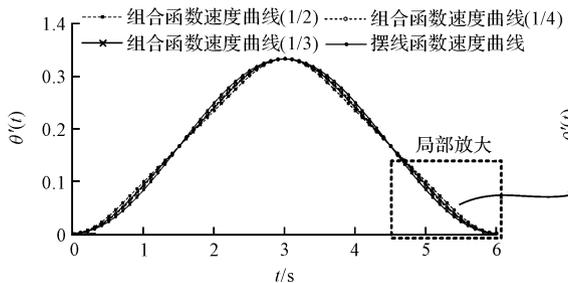


图4 速度对比图

如图4来看,几种轨迹规划的速度曲线差别也不大,组合函数的n值越大,曲线在启停阶段愈加平缓,1/16周期处(1.5 s)速度快速增长,1/8周期处(3 s)

增大,位移曲线在启停阶段愈加平缓。 $n \rightarrow \infty$ 时组合函数的曲线与摆线函数相重合。所以从位移对比图来看,组合函数轨迹规划具有较好的启停平稳性。

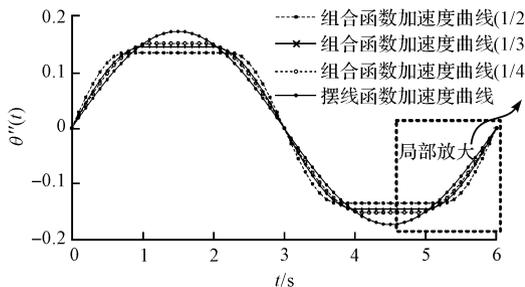


图5 加速度对比图

如图5所示,从加速度曲线来看,组合函数驱动加速度曲线最大值相对于摆线函数较小,且随着n值的增大,最大加速度越大。相比于摆线函数,组合函数加速度的减少量与运动角度的变化幅值U有关。以1/2周期为矩形函数的组合函数加速度曲线为例,其最大无量纲加速度约为0.14,而摆线

速度达到最大。 $n \rightarrow \infty$ 时组合函数与摆线函数重合。从速度曲线也可以看出,组合函数轨迹规划具有相对较好的启停平稳性。

函数的最大无量纲加速度为0.18。而加速度最大值是衡量机构动力学特性的重要指标之一,最大加速度越大,机构的最大惯性力就会越大。因此,虽然位移曲线和速度曲线两种轨迹相似,但是相比于摆线,组合函数函数作为驱动,机构的动力学特性更优。

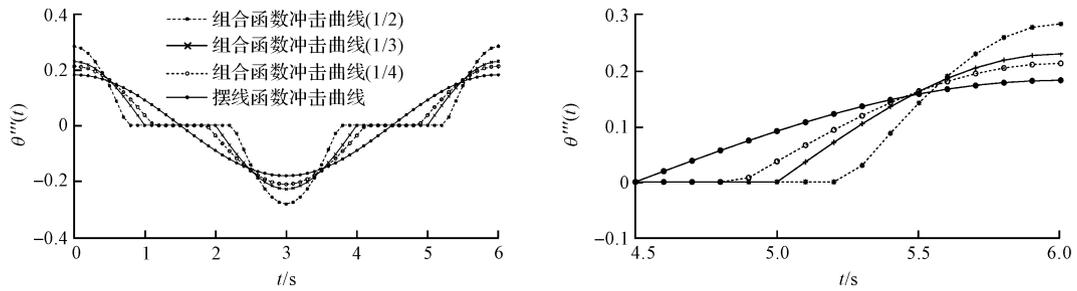


图6 冲击对比图

如图6所示,从冲击曲线来看,相比于摆线函数,组合函数驱动的最大刚性冲击虽然略微大一些,但在整个运动周期中,组合函数只是在起始阶段和中间一段会产生冲击。因此,相比于摆线函数,采用组合函数形式驱动的机构运行稳定性要更好些。

综上所述,基于摆线函数和矩形函数的组合函数不仅在位移和速度上具有较好的启停平稳性,能够满足脚踝康复患者运动过程平稳性的要求,而且可保证整个康复运动周期内,机构最大惯性力和冲击均较小,从而提高机构运行的稳定性。

### 4 ADAMS 仿真实验分析

不妨以  $n = 2$  的组合函数轨迹为例,基于 ADAMS 仿真软件,探讨前叙两种函数驱动下各推杆的输出规律与末端参考点的运动轨迹。研究表明,人体踝关节安全运动范围如表1所示<sup>[21-22]</sup>。

表1 人体踝关节安全运动范围

运动类型	运动范围 / °
跖屈 / 背屈	[ - 30 30 ]
内翻 / 外翻	[ - 22 17 ]
外展 / 内收	[ - 25 30 ]

将各运动的安全范围值代入驱动函数,可得不同康复运动下的运动曲线及各推杆相应位移。篇幅所限,仅以跖屈 / 背屈运动为例,仿真主要流程如图7所示。

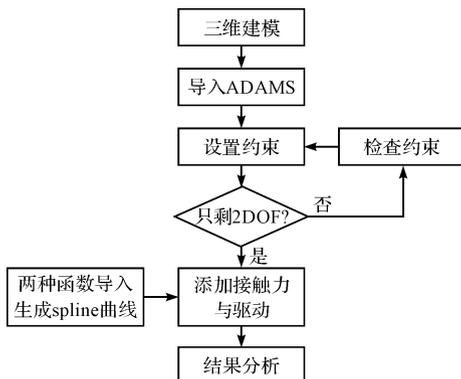


图7 跖屈 / 背屈运动仿真流程图

由上述流程可得在不同函数驱动下,各推杆的位移、速度、加速度以及末端参考点的运动规律。

两种组合函数驱动下,1/4个跖屈 / 背屈运动周期内,各推杆位移、速度、加速度对比图如图8所示。

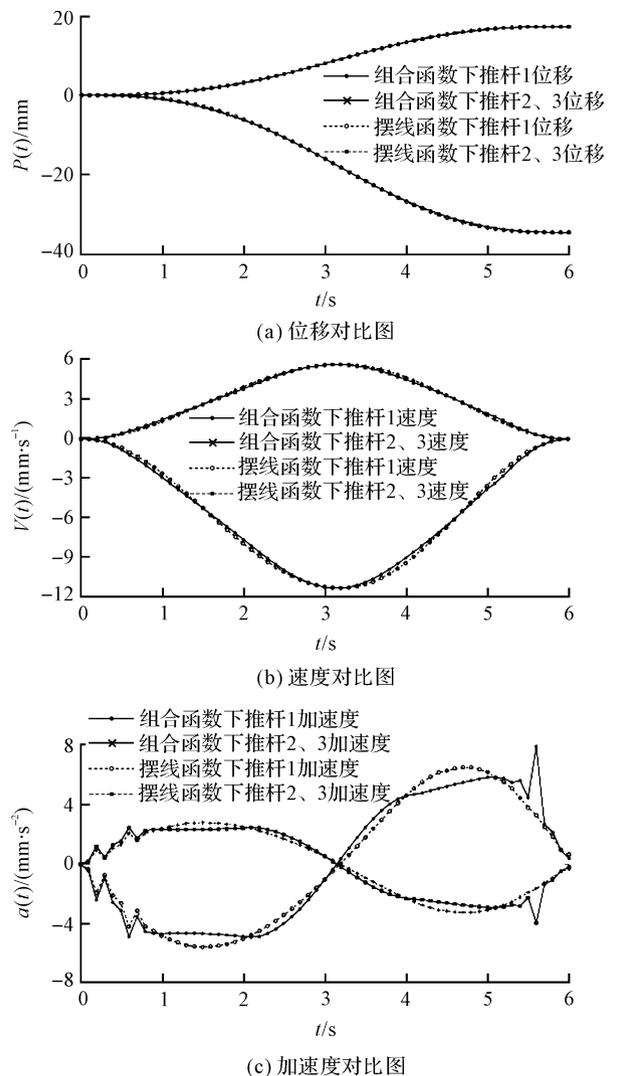


图8 两种函数驱动下推杆各参数对比图

由图8(a ~ b)可知,组合函数驱动患者脚踝进行跖屈 / 背屈运动时,位移和速度都与摆线差别不大,两种方法均具有较好的平稳性,启停阶段速度均为0,无阶跃变换。但相比于摆线函数,如图8(c)所示,虽然在

仿真的过程中,由于存在接触力约束,以及各推杆与动平台之间的相互滑移,加速度曲线有一些波动,但根据基本变化规律,可得组合函数最大加速度相比于摆线函数减小近  $1 \text{ mm/s}^2$ 。仿真实验验证了前述两种函数

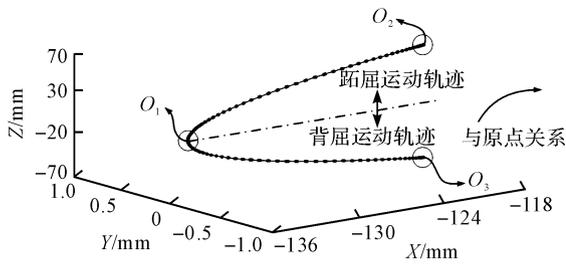


图9 末端参考点运动轨迹

由图9可知,末端参考点在动平台进行跖屈/背屈运动过程中,以点  $O_1(-135, 0, 0)$  作为节点,进行上下往复运动,上部和下部分别为动平台进行跖屈运动和背屈运动时,参考点的轨迹。跖屈运动时,参考点从  $O_1(-135, 0, 0)$  运动至  $O_2(-118, 0, 68)$ ,背屈运动时,参考点从  $O_1(-135, 0, 0)$  运动至  $O_2(-118, 0, -68)$ 。从参考点运动轨迹与原点之间的关系可知,通过3个推杆的相互配合运动,实现了机构动平台  $-30^\circ \sim 30^\circ$  的跖屈/背屈运动。

## 5 结束语

基于新型混联式脚踝康复机器人,本研究将传统摆线函数与矩形函数相组合,提出了一种组合函数形式的轨迹规划。

本研究通过构建机构并联部分各支链封闭的几何回路,对所提机构的逆向运动学进行了研究,得到了各推杆与动平台之间的关系。

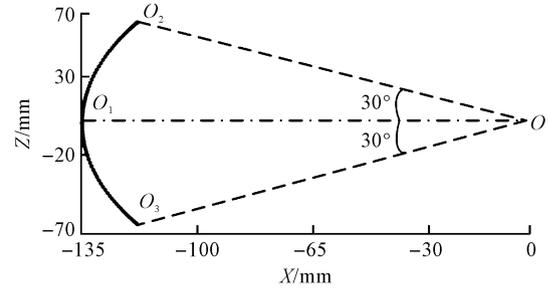
与传统摆线函数的轨迹规划相比,本研究所提组合函数形式的轨迹规划在保证机构运动平稳性的前提下,可减小机构运动最大加速度,减小康复运动过程中的冲击。

基于运动学逆解,本研究求出了跖屈/背屈运动下各推杆的输出,并将其导入 ADAMS 仿真软件中进行仿真实验,得到了各推杆的位移、速度、加速度实际对比图以及末端参考点的运动规律。

总之,本文提出了一种启停平稳性较好,最大速度/加速度、刚性冲击较小的组合函数形式应用于一种新型混联式脚踝康复机构,通过理论对比和实验分析,验证了该组合函数相比于传统摆线函数的优势,为脚踝康复机器人的控制提供了基础

驱动下各参数的变化规律。

将末端连接杆(1)与摇杆(2)的连接点  $O_1$  作为参考点(如图1所示),考察其相对于原点  $O$  的运动规律,结果如图9所示。



数据。

## 参考文献 (References):

- [1] 汪家琮. 踝关节和足的康复[J]. 中国康复理论与实践, 2008, 14(12): 1197-1198.
- [2] GIRONE M J, BURDEA G C, BOUZIT M. Rutgers ankle orthopedic rehabilitation interface [J]. *ASME Dynamic Systems & Control Division DSC*, 1999, 67(1): 305-312.
- [3] DAI J S, ZHAO T, NESTER C. Sprained ankle physiotherapy based mechanism synthesis and stiffness analysis of a robotic rehabilitation device[J]. *Autonomous Robots*, 2004, 16(2): 207-218.
- [4] SAGLIA J A, DAI J S, CALDWELL D G. Geometry and kinematic analysis of a redundantly actuated parallel mechanism that eliminates singularities and improves dexterity[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(12): 1786-1787.
- [5] TAKEMURA H, ONODERA T, DING M, et al. Design and control of a wearable stewart platform-type ankle-foot assistive device[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012, 9(5): 1-7.
- [6] JAMWAL P K, XIE S Q, HUSSAIN S, et al. An adaptive wearable parallel robot for the treatment of ankle injuries [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(1): 64-75.
- [7] AGRAWAL A, BANALA S K, SANGWAN V, et al. Design of a novel two degree-of-freedom ankle-foot orthosis[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2007, 129(11): 1137-1143.
- [8] YOON J, RYU J, LIM K B. Reconfigurable ankle rehabilitation robot for various exercises[J]. *Journal of Field Ro-*

- botics,2006,22(S1):S15-S33.
- [9] 刘颖超. 气动并联式踝关节康复机器人的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电学院,2014.
- [10] 曾达幸,胡志涛,侯雨雷,等. 一种新型并联式解耦踝关节康复机构及其优化[J]. 机械工程学报,2015,51(9):1-9.
- [11] LU Y, ZHAO X Q, ZHANG Z X, et al. Research on improved cycloid foot trajectory of quadruped robot[J]. **Applied Mechanics & Materials**,2013(278-280):576-581.
- [12] 庄 鹏,姚正秋. 基于摆线运动规律的悬索并联机器人轨迹规划[J]. 机械设计,2006,23(9):21-24.
- [13] LEI J, WANG F, YU H, et al. Energy efficiency analysis of quadruped robot with trot gait and combined cycloid foot trajectory[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**,2014,27(1):138-145.
- [14] FRANCIS B, ELLIOTT A, WELDON M. Smoothing group-based trajectory models through B-splines[J]. **Journal of Developmental and Life-Course Criminology**, 2016, 2(1):113-133.
- [15] Dai Z, Sheng X, Hu J, et al. Design and implementation of Bézier curve trajectory planning in DELTA parallel robots [C]. International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Portsmouth: Springer International Publishing,2015.
- [16] JAHANPOURJ, MOTALLEBI M, PORGHOVEH M. A novel trajectory planning scheme for parallel machining robots enhanced with NURBS curves[J]. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**,2016,82(2):257-275.
- [17] 田西勇,刘晓平,庄 未,等. 基于组合正弦函数的机器人轨迹规划方法[J]. 机械工程与自动化,2008(1):136-138.
- [18] MA S, YANG L, LIU Z, et al. Trajectory planning of 6-DOF manipulator based on combination function method [C]. Chinese Control and Decision Conference, Los Angeles:IEEE,2014.
- [19] 卢君宜,杨庆华,高峰,等. 五自由度农业采摘机器人轨迹规划[J]. 机电工程,2010,27(12):1-6.
- [20] 徐 达,夏 祥,李 华,等. 基于组合函数的弹药装填机器人轨迹规划[J]. 装甲兵工程学院学报,2013,27(2):47-50.
- [21] ORTEGA A B, MÁRMOL E Q, VALDES G V, et al. Control of a virtual prototype for ankle rehabilitation[C]. International Conference on Intelligent Environments, Guanajuato: IEEE,2012.
- [22] LIU G, GAO J, YUE H, et al. Design and kinematics analysis of parallel robots for ankle rehabilitation[C]. International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin: IEEE,2006.

[编辑:李 辉]

#### 本文引用格式:

廖志炜,张 俊,卢宗兴,等. 基于组合函数的脚踝康复机器人轨迹规划[J]. 机电工程,2018,35(3):302-309.

LIAO Zhi-wei, ZHANG Jun, LU Zong-xing, et al. Combined function based trajectory planning for a novel ankle rehabilitation robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(3):302-309.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>