

缩放式步行机构足端轨迹规划 与控制系统及实验研究

臧 慧 业

摘要: 综合了用作步行机构的缩放机构的原理和运动特性。提出了步行机对足端轨迹的要求。给出了适合于缩放式步行机构的足端轨迹规划方法,提高了步行机的节能性和适应性。建立了一套缩放式步行机构的微机控制系统,通过实验验证了理论结果,对整个系统进行了误差测试和精度分析,建立了缩放机构的误差模型,给出了该步行机构的自重平衡方法。

一、引言

步行机是可以行走的机器人,它的运动是一个非常复杂的过程,涉及到许多问题,如各足的协调性,机体的稳定性,跨越障碍及适应不同地面的能力,能量利用率,承载能力,运动精度的高低,控制算法的难易及控制系统的复杂程度等;这些问题都与步行机的步行机构有关,步行机构的各项性能直接影响着步行机水平的提高。圆柱缩放机构由于在其它平面内两个方向的运动相互独立,互不干涉,具有运动解耦性,结构比较简单,运动易于控制,能实现较大的工作区间等特点,而被广泛地用做步行机构,但从资料上可看出,人们侧重于它的应用,而对有的方面缺少分析和研究,本文旨在弥补这个不足,在缩放式步行机构的足端轨迹规划,控制系统,及精度分析等方面做了详细的分析和研究,并通过实验进行了验证为以后的步行机构及步行机的设计提供理论参考。

二、缩放机构原理及运动特性

1. 原理

空间缩放机构简图如图1所示

固结在机构上的动坐标系 $0_1x_1y_1z_1$ 绕定坐标系 $0xyz$ 的 z 轴旋转,角度为 θ ,各运动输入量为 $\vec{P} = [P_z, \theta, P_x]^T$ 则足端 M 的坐标为 $\vec{M} = [M_x, M_y, M_z] = [KP_z \cos\theta, KP_z \sin\theta, P_z(1-K)]^T$

$$K = \frac{AD}{AC} = \frac{DM}{DE} \text{ 为缩放比}$$

速度和加速度方程为

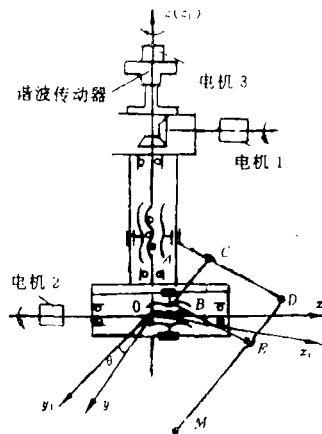


图1 缩放式步行机构简图

$$\begin{aligned} \dot{\underline{M}} &= [V] \dot{\underline{P}} \\ \ddot{\underline{M}} &= [A] \ddot{\underline{P}} \end{aligned}$$

2. 运动特性

平面 $0_1x_1z_1$ 是运动主平面,在主平面内, M_i 与 M_j 相互独立,两个运动互不干涉,具有解耦性,足端的位移,速度和加速度都与 A 、 B 两驱动器的位移,速度与加速度成线性关系,已知一方求另一方都很简便。

三、缩放式步行机构足端轨迹规划

1. 步行机对足端轨迹的要求

步行机在运动过程中,每条腿依次经过抬腿、前伸;支撑着地带动机体前进等周期性过程。步行机对足端轨迹的要求有以下几点:

(1) 为了提高机体的稳定性和避免不必要的能量损失,步行机构着地带动机体前进时应保持恒速,并且保持机体重心高度不变,则足端相对于机体处于支撑相时的轨迹应为平行于运动方向的直线、

(2) 为了减少和消除抬腿及落腿时产生冲击及滑步,足端在抬腿及落腿时刻应满足速度和加速度的要求,并且在整个过程中速度和加速度应处处连续。

(3) 为适应不同路面及跨越障碍的要求,足端抬起的高度及持续时间应可调。

(4) 为使步行机整机运动协调,提高运动效率及稳定性,游足相时间应小于支撑相时间。

2. 缩放式步行机构足端轨迹规划

足端轨迹就是步行机在运动过程中,步行机构的足端相对于机体的运动轨迹。它直接影响着步行机适应不同路面的能力,跨越障碍和沟壑的能力,足端与路面的振动冲击,滑步及能量损失,控制算法等诸因素,关系到步行机性能的好坏。它不应是几种简单曲线的组合,而应使它充分满足步行机对足端轨迹的要求。缩放式步行机构在其主平面内具有运动解耦性,足端运动参数和驱动器的运动参数成线性关系,运动学求逆计算简单,因而把足端轨迹分解成 x 方向和 z 方向分别规划。依据步行机对足端轨迹的要求,并使计算量尽量小,我们采用三次样条函数分段插值的方法来规划足端轨迹,但是单一的三次样条分段插值函数不能同时满足抬腿及落腿时刻足端速度与加速度的要求,因此,把游足相轨迹分成三节:起始节、过渡节、终止节。起始节和终止节为三次样条分段插值函数,过渡节为一个五次函数。支撑相轨迹为一直线。此轨迹能完全满足所提出的要求。

起始节和终止节轨迹的规划:

已知: $T_1 = t_1 < t_2 < \dots < t_k = T_2$

各结点函数值: $x(t_i) = x_i$, $i = 1, 2, \dots, k$, 共有 k 个结点则可利用 Hermite 插值公式写出 $[t_i, t_{i+1}]$ 上的三次样条函数 $x_i(t)$ 的计算公式:

$$\begin{aligned} x_i(t) &= (1 + 2 \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i}) (\frac{t-t_{i+1}}{t_i-t_{i+1}})^2 x_i + (1 + 2 \frac{t-t_{i+1}}{t_i-t_{i+1}})^2 x_{i+1} \\ &+ (t-t_i) (\frac{t-t_{i+1}}{t_i-t_{i+1}})^2 m_i + (t-t_{i+1}) (\frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i})^2 m_{i+1} \end{aligned} \quad (1)$$

令 $h_i = t_{i+1} - t_i$

利用 $x(t)$ 一阶, 二阶导数连续的性质可得递推公式:

$$(1 - \alpha_i) m_{i-1} + \alpha_i m_i + \alpha_i m_{i+1} = \beta_i \quad (2)$$

式中: $\alpha_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}$

$$i = 2, 3, \dots, k-1$$

$$\beta_i = 3 \left[\frac{1 - \alpha_i}{h_{i-1}} (x_i - x_{i-1}) + \frac{\alpha_i}{h_i} (x_{i+1} - x_i) \right]$$

再联立所必需满足的速度和加速度的两个边界条件, 就可解得出 $m_i (i = 1, 2, \dots, k)$ 代入 (1) 便可得到逐段的三次样条插值函数。

过渡节轨迹的规划

由起始节和终止节轨迹规划中可求出过渡节起点和终点的速度与加速度, 再加上已知两点的位置共六个边界条件, 便可构造出一个五次函数:

$$x(t) = P_5 t^5 + P_4 t^4 + P_3 t^3 + P_2 t^2 + P_1 t + P_0$$

为不影响整体插值效果, 过渡节应尽量短。

四、缩放式步行机构控制系统

步行机构的控制可以看成路径—轨迹追踪问题, 我们采取连续轨迹控制方式。以 MCS—51 系列的 8031 为 CPU, 集中控制。

1. 控制系统的硬件设计

硬件结构包括: 8031 单片机, 外部程序存储器 EPROM 764, 外部数据存储器 RAM 6264, 可编程定时器 8253, 地址锁存器, 光电耦合器, 行程保护电路, 时钟复位电路, 驱动电源等。

驱动器采用反应式三相步进电动机。运行方式为三相六拍。转速控制信号脉冲由 8253 产生; 转向控制信号由 8031 的 P_1 口产生。

2. 控制系统的软件设计

本系统的软件采用 M(S—5) 汇编语言编写, 调试通过后, 固化在 EPROM 里。

转速控制采用中断控制方式, 利用 8031 内部定时器定时中断, 每中断一次就更换一次输入到 8253 中的计数值, 产生不同频率的脉冲, 从而控制步进电机的转速。

转向控制是通过设置转向标置位来实现的。

行程控制采用计数器控制方式实现, 把 8253 计数值的总数放在计数器中, 每取走一个, 计数器减一, 当计数器为零时, 一个运动周期结束。

程序包括主控程序, 数制转换子程序, 定时中断子程序, 外部中断子程序。

五、实验测试及精度分析

1. 实验测试

首先在 IBM—PC/AT 机上把已规划出的足端轨迹进行了仿真, 然后利用控制系统控制步行机构模型得到实际的轨迹, 并把二者做了比较, 它们极为相近, 说明本控制系统是可行的。用数显光栅尺测量了足端的 x 向和 z 向位移, 以及 x 向滚珠丝杠螺母的位移, 从而得

出控制系统的误差及本缩放式步行机构模型的运动误差

2. 精度分析

本文分析了缩放机构产生运动误差的误差源：杆长误差，运动副间隙误差，装配误差及构件产生弹性变形而产生的误差。用微小位移合成法建立了由于杆长误差而带来的缩放机构运动误差的误差模型。并对微机控制系统的误差做了简要分析。

六、缩放式步行机构的自重平衡

如果步行机构的自重不平衡，则势必会增加驱动力，浪费驱动能量。对于缩放式步行机构，使其自重平衡的目的是尽量减小由机构自重而在A、B两点引起的广义等效力，此力由虚功原理求出，经理论推导，在图2所示的位置经附加适当的配重可使机构完全达到自平衡。

七、结束语

通过理论分析和实验，可得以下结论：

1. 本文提出的足端轨迹规划方法简便而直观，并能充分地满足步行机对轨迹的要求，其算法容易编制成计算机程序，计算准确。

2. 控制系统采用硬件和软件有机结合的方法控制精度高，稳定可靠。

3. 所建立的误差模型和提出的自重平衡方法具有通用性，为以后的缩放式步行机构设计提供理论参考。

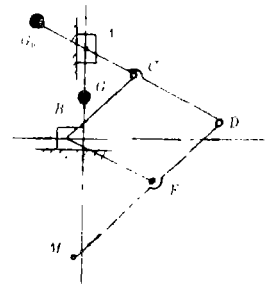


图2

参 考 文 献

[1] 徐萃薇；《计算方法引论》，高等教育出版社，1980
 [2] 徐君毅等；《单片微型计算机原理与应用》上海科学技术出版社，1984年
 [3] S. M. Song et al.; Mechanism and Machine Theory, 22, No. 4, 1987

A Trajectory Planning and Control System and Experiment Studies of a Pantograph Walking Mechanism

Zang Huiye

Abstract

In this paper, we synthesized the principle and kinematics of a pantograph mechanism, proposed the request of walking robot for the trajectory of foothold. A method of trajectory planning of foothold suitable for pantograph walking mechanism is given,

this decreases the wasting energy and invrease the suitability of walking robot. A microcomputer control system of pantograph walking mechanism is built up, which verified the theory by experiment. It analysed the accuracy of the whole system, and built up the error model of the pantograph mechanism. A balance method of this mechanism is provided.