

基于单位圆法的仿人机器人行走系统步态规划^①姜大伟^② 胡孔明 张邦成^③ 孙建伟 张 昊

(长春工业大学机电工程学院 长春 130012)

摘 要 针对现有仿人机器人行走系统步态规划计算过程复杂的问题,提出了一种基于单位圆法的步态规划方法,并用此方法进行了步态规划研究。建立了仿人机器人行走系统运动模型,运用单位圆法计算了起脚过程的步态参数;结合地面约束条件和运动约束条件,创建了关键时刻约束条件方程式,应用高次插值方法得到了行走系统的步态曲线,并依据规划参数进行了实验和相对误差分析。结果表明,基于单位圆法的步态规划方法正确,简化了仿人机器人步态规划过程,为仿人机器人行走系统的步态控制提供了参考依据。

关键词 仿人机器人,步态规划,单位圆法

0 引 言

机器人步态规划的目的是要得到其各关节运动的轨迹。步态是机器人腿部按一定规律运动的过程,可由步行运动过程中各关节的运动轨迹描述。足部运动是根据环境情况及动作要求来设定,腰部运动主要根据仿人机器人的稳定性及作业姿态的要求来规划,如果双足的运动轨迹和腰的运动轨迹已知,则机器人下肢的全部关节运动轨迹都可以通过逆运动学获得,获得了下肢的全部关节运动轨迹,也就获得了步态的变化过程^[1-3]。现今规划方法中,基于运动学和动力学计算的方法应用较多:黄强等基于零力矩点(zero moment point, ZMP)稳定判据给出了一系列步态规划方法^[3];Katija 等将复杂的动力学模型简化,用倒立摆的方法获得了参考轨迹^[4,5];窦瑞军等按动态补偿最小的条件用遗传算法对机器人的步态进行了参数化优化设计^[6];伊强等采用参数化步态优化方法,将复杂关节轨迹的规划问题转化为分段多项式系数组成的有限参数向量的优化问题,得到了快速和慢速两组光滑无振动的优化步态^[7];阮鹏等通过对壁虎爬行运动进行研究,设计出了一种仿生物的爬行步态^[8];杨东超等提出了逆

两步规划法^[9];李敬等提出了一种基于人体运动规律的仿人机器人步态参数设定方法,并通过偏航力矩补偿算法,提高了机器人行走稳定性^[10]。

上述方法都针对不同机器人得出了理想步态,但是计算过程相对复杂,因此,本文以 10 自由度仿人机器人行走系统为例提出了一种基于单位圆法的步态规划方法,该方法可使规划过程得到简化。本研究在分析 10 自由度行走系统行走过程的基础上建立了行走系统运动模型,基于单位圆法对系统起脚过程进行了步态参数计算;结合地面约束条件和运动约束条件,创建了关键时刻约束条件方程式,用三次样条插值方法得到了行走系统关键部位的轨迹曲线;将理论计算得出的轨迹与实验轨迹进行了对比,并以理论数据为约定真值对关键时刻位移做了相对误差分析,轨迹对比和误差分析结果证明了该规划方法及参数计算的正确性。

1 行走系统运动描述

仿人机器人的行走系统包括:支撑腰部的腰板、大腿、小腿、脚板以及连接这些部件的连接件和传动系统,是仿人机器人的重要组成部分之一。行走系统的运动是通过关节活动及关节间的相互协调来实

① 863 计划(2010AA040201),教育部新世纪人才项目(NCET:120731)和吉林省教育厅“一二五”(2013123)资助项目。

② 男,1979 年生,硕士,讲师;研究方向:仿人机器人技术;E-mail:jiangdawei@mail.ccut.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail:zhangbangcheng06@tsinghua.org.cn

(收稿日期:2013-05-06)

现的。10 自由度仿人机器人行走系统自由度分配如下:髋关节 2 自由度,膝关节 1 自由度,踝关节 2 自由度。如图 1 所示。

本文将仿人机器人行走系统抽象为空间刚性连杆机构,其前进方向和左右方向运动原理如图 2 所示。其中参数如下:

- l_1 ——表示大腿长度;
- l_2 ——表示小腿长度;
- l_3 ——表示踝关节到脚尖的水平距离;
- l_4 ——表示踝关节到脚板的长度;

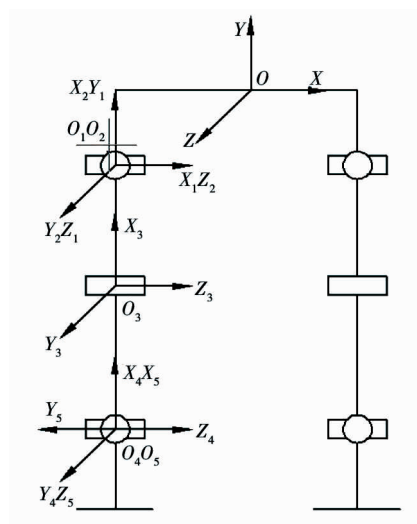
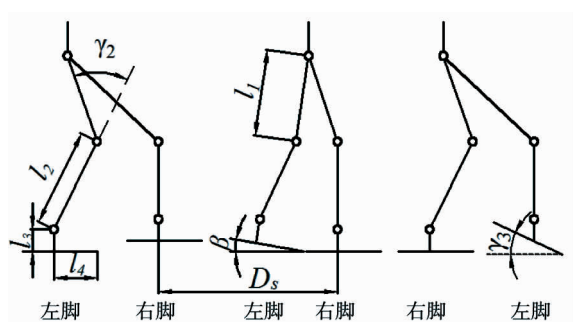
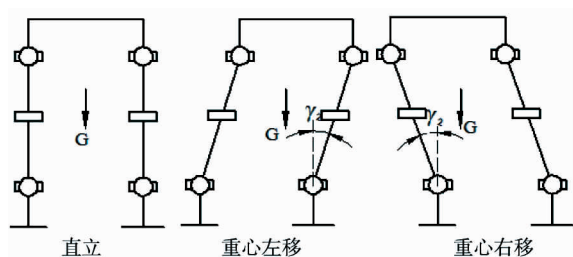


图 1 仿人机器人行走系统自由度分布图



(a) 机器人前进运动



(b) 机器人左右方向运动

图 2 机器人运动原理图

D_s ——表示初步设定的步长;

γ_1 ——表示膝关节屈膝角度;

γ_2 ——表示重心向左右侧移时腿部侧移角度;

β ——表示脚离地时刻脚板与地面的倾角;

γ_3 ——表示脚落地时刻脚板与地面的倾角。

仿人机器人在行走过程中,必然会出现如下三个阶段:

(1)起步阶段:首先是仿人机器人行走系统重心向左偏移,接着以左脚为支撑脚,电机带动右腿各关节转动实现右脚向前迈进运动,到达指定位置后,电机带动右腿实现右脚着地运动;

(2)周期行走阶段:伴随重心偏移,电机带动两脚以固定周期交替向前迈进,实现前进运动;

(3)收脚阶段:与起步阶段运动相似,首先仿人机器人行走系统重心向左偏移,电机带动右腿迈出并且右脚以 γ_3 倾角着地到达与左脚平行的位置,然后重心回归,完成整个行走过程。

脚部轨迹可表示为

$$X_a = [x_a(t), y_a(t), z_a(t), \theta_a(t)]^T \quad (1)$$

腰部轨迹可表示为

$$X_h = [x_h(t), y_h(t), z_h(t), \theta_h(t)]^T \quad (2)$$

其中:

$[x_a(t), y_a(t), z_a(t)]^T$ ——踝关节的位置坐标;

$[x_h(t), y_h(t), z_h(t)]^T$ ——腰部的位置坐标;

$\theta_a(t)$ ——脚板与地面的倾角;

$\theta_h(t)$ ——腰部与地面的倾角。

2 单位圆法和步态规划

2.1 单位圆法

在分析仿人机器人行走系统行走过程中,发现起脚过程整个脚以 OD 为轴线开始抬起,由于脚部的各部位间相对位置不随抬脚高度而改变,整个脚绕 OD 轴旋转,其断面图构成一个单位圆。可将起脚过程视为在一个单位圆内完成,将起脚过程理想化为如图 3 所示的模型。

初始状态为 OAB 位置,起脚状态为 OA_1B_1 位置, $l_3 = OA$, $l_4 = AB$, $\beta = \angle BOB_1$ 。

设 $\rho = OB = \sqrt{l_3^2 + l_4^2}$, $\alpha = \angle BOA \in (0, 90^\circ)$, 脚沿 OD 轴的转动角速度为 ω_0 , B 点的线速度为 v_0 。

运用单位圆计算得:

$$\beta = \angle BOB_1 = \omega_0 t \quad (3)$$

$$v_0 = \rho \omega_0 \quad (4)$$

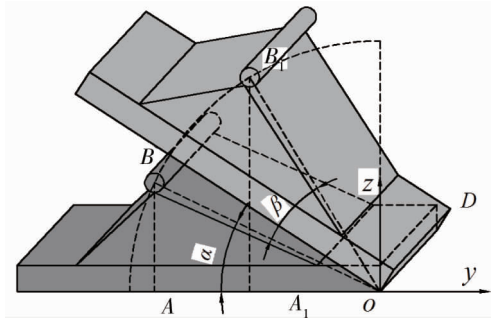


图3 单位圆法计算简图

沿 y 方向的速度为

$$v_y = \rho\omega_0 \sin(\alpha + \omega_0 t) \quad (5)$$

沿 z 方向的速度为

$$v_z = \rho\omega_0 \cos(\alpha + \omega_0 t) \quad (6)$$

由此可得:

y 方向相对初始位置的位移为

$$\begin{aligned} y &= \int_0^t \rho\omega_0 \sin(\alpha + \omega_0 x) dx \\ &= \rho[\cos\alpha - \cos(\alpha + \omega_0 t)] \end{aligned} \quad (7)$$

z 方向相对初始位置的位移为

$$\begin{aligned} z &= \int_0^t \rho\omega_0 \cos(\alpha + \omega_0 x) dx \\ &= \rho[\sin(\alpha + \omega_0 t) - \sin\alpha] \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 踝关节轨迹规划

对步行阶段的参数做如下设定:

T_0 ——起始时刻;

T_c ——行走一步的周期为 T_c ;

T_L ——右脚跟离地时刻;

T_m ——右脚在最高点时刻;

L_m ——脚踝前进方向的位移;

H_m ——脚踝上下方向的高度。

左脚轨迹与右脚轨迹只相差一个 T_c 延迟,此处未讨论左脚运动轨迹生成情况。根据位置约束条件和地面约束条件得出右脚约束条件方程式:

$$\theta_a(t) = \begin{cases} 0, & t = KT_c + T_0 \\ \omega_0, & t = KT_c + T_L \\ 0, & t = KT_c + T_m \\ 0, & t = KT_c + T_c \end{cases} \quad (9)$$

$$y_a(t) = \begin{cases} 0, & t = KT_c + T_0 \\ \rho[\cos\alpha - \cos(\alpha + \omega_0 t)], & t = KT_c + T_L \\ L_m, & t = KT_c + T_m \\ D_s, & t = KT_c + T_c \end{cases} \quad (10)$$

$$z_a(t) = \begin{cases} l_4, & t = KT_c + T_0 \\ l_4 + \rho[\sin(\alpha + \omega_0 t) - \sin\alpha], & t = KT_c + T_L \\ H_m, & t = KT_c + T_m \\ l_4, & t = KT_c + T_c \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_a(KT_c) = 0 \\ \dot{\theta}_a(KT_c + T_c) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{y}_a(KT_c) = 0 \\ \dot{y}_a(KT_c + T_c) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_a(KT_c) = 0 \\ \dot{z}_a(KT_c + T_c) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

该规划方法针对的是行走系统的直线运动, $x_a(t) = 0$ 可不予考虑,所以足部轨迹为关于时间 t 的函数 $X_a = [x_a(t), y_a(t), z_a(t), \theta_a(t)]^T$ 。

根据已知约束条件所得出的式(9)和式(12),式(10)和式(13),式(11)和式(14),运用三次样条插值方法得到 $y_a(t)$ 、 $z_a(t)$ 及 $\theta_a(t)$ 关于时间 t 的轨迹曲线,如图4所示。

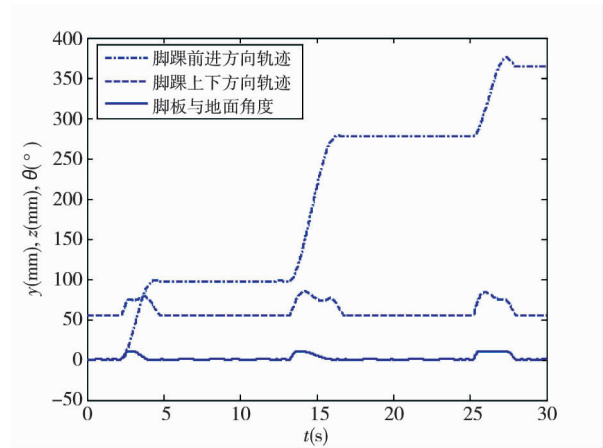


图4 踝关节各方向轨迹曲线

由图4可看出:

(1) 脚踝前进方向: 迈步阶段腿部匀速前进, 脚踝位移呈直线上升; 最后一步右脚着地时与地面呈 γ_3 角, 脚尖着地时脚踝位移比最终落地时的位移多 $\rho[\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma_3)]$;

(2) 脚踝上下方向: 脚部抬高的同时向前迈进, 脚踝以髌关节为中心做类圆周运动, 曲线呈先下降后上升的趋势直到落地;

(3) 脚板与地面角度: 前两步先由 0 上升至 γ_1 再由 γ_1 下降至 0, 然后以 0 落地, 最后一步一直保持 γ_1 直到脚尖着地, 然后由 γ_1 下降至 0。

2.3 腰部轨迹规划

此处以两髋关节连线的中点代替系统的腰关节。在整个行走过程中,腰板始终与地面保持平行,即 $\theta_h(t) \equiv 0$, 规划过程中可不予计算。另参考文献[3],可从零力矩点(ZMP)计算公式看出 $z_h(t)$ 对 ZMP 值的影响较小,可假定 $z_h(t)$ 为常数;且仿人机器人行走系统在两个相互垂直的方向(x 方向和 y 方向)的 ZMP 可以认为是相互独立的,运动轨迹可以独立规划。腰部前进方向运动原理如图 5 所示。

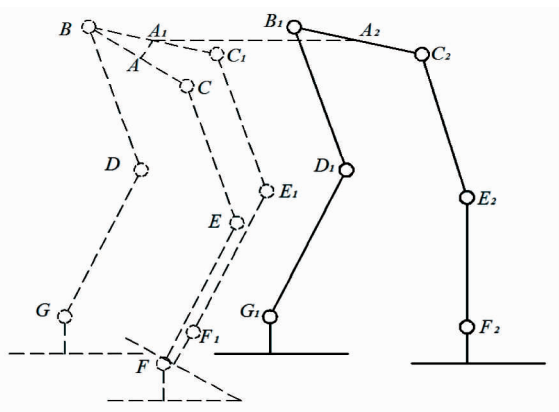


图 5 腰部前进方向计算简图

设定位置 1 为 $GDBACEF$ 的位置,位置 2 为 $GDBA_1C_1E_1F_1$ 的位置,位置 3 为 $G_1D_1B_1A_2C_2E_2F_2$ 的位置。

当系统从初始位置 1 运动到位置 2 时,髋关节从 C 运动到 C_1 。点 A 和 A_1 分别是 BC 和 BC_1 的中点,脚离地时刻腿部保持姿态不变,可得 $CC_1 = \rho[\cos\alpha - \cos(\alpha + \omega_0 t)]$ 。当系统从位置 2 运动到位置 3 时,刚性杆 $B_1A_2C_2$ 上各质点具有同样的速度;又因各关节运动时间很短,可假定都是以速度 v_1 匀速运动。

腰部左右方向运动原理如图 6 所示。

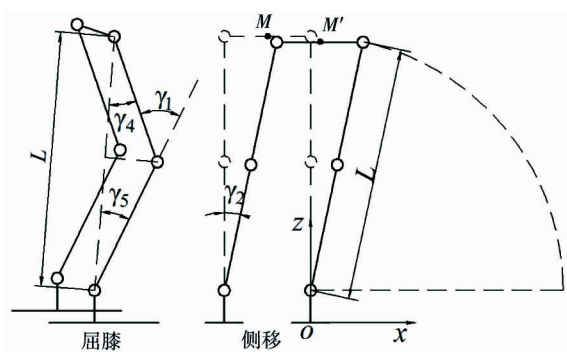


图 6 腰部左右方向计算简图

由于 $z_h(t)$ 对 ZMP 值的影响较小,且在运动过程中总有一条腿与地面接触且该腿决定了 $z_h(t)$ 的变化,腰部关于左右方向的移动等于中点 M 点的移动, M 点运动到 M' 点的位移 $MM' = L\sin\gamma_2$; 整个过程中腰部左右方向的运动可表示为: $x_h(t) = L\sin\omega t$ (式中 ω 为踝关节运动的角速度)。按照运动约束条件给出下面的运动约束方程:

$$x_h(t) = \begin{cases} 0 & t = KT_c + T_0 \\ L\sin\omega_1 t, & t = KT_c + T_L \\ L\sin(\omega_1 t_1 + \omega_2 t), & t = KT_c + T_m \\ L\sin(\omega_1 t_1 + \omega_2 t_2 + \omega_3 t), & t = KT_c + T_c \end{cases} \quad (15)$$

$$y_h(t) = \begin{cases} 0, & t = KT_c + T_0 \\ \frac{1}{2}\rho[\cos\alpha - \cos(\alpha + \omega_0 t)] & t = KT_c + T_L \\ v_1 t + \frac{1}{2}\rho[\cos\alpha - \cos(\alpha + \omega_0 t)], & t = KT_c + T_m \\ v_1 t_1 + \frac{1}{2}\rho[\cos\alpha - \cos(\alpha + \omega_0 t)], & t = KT_c + T_c \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_h(KT_c) = 0 \\ \dot{x}_h(KT_c + T_c) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \dot{y}_h(KT_c) = 0 \\ \dot{y}_h(KT_c + T_c) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

由式(15)和式(16),以及式(17)和式(18),运用三次样条插值方法得出 $x_h(t)$ 和 $y_h(t)$ 关于时间 t 的轨迹曲线,如图 7 所示。

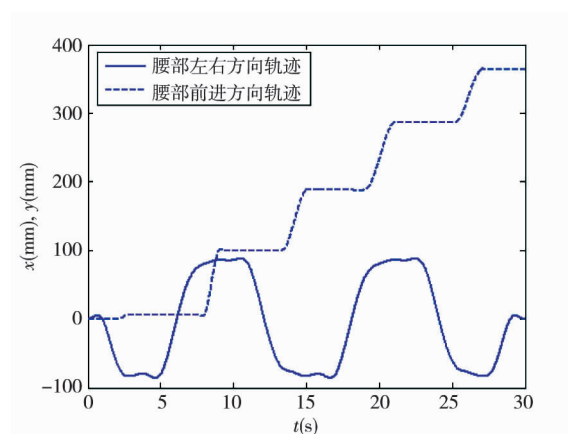


图 7 腰部各方向运动轨迹曲线图

由图 7 可以看出,在腰部前进方向:由于前 2s 是下蹲阶段,系统没有前进,所以第一步前进周期比其他步前进运动周期长;腰部左右方向:由于第一步

和第三步比第二步段迈步幅度小,运动周期短。

以上规划的抬脚过程中,各方向的位移都可用单位圆法进行求解,然后通过逆运动学求得每一关节的轨迹;迈步过程需设定这些位移参数后再计算。

3 实验与验证

理论参数如下:

(1)起步阶段:步态周期 $T_{c1} = 2.8\text{s}$,步长 $D_{s1} = 97\text{mm}$,脚离地角度 $\beta = 10^\circ$,悬空脚离地时刻 $T_{l1} = 2.6\text{s}$,脚落地角度 $\gamma_2 = 0^\circ$,悬空脚离地最高位置 $H_{m1} = 76.13\text{mm}$,悬空脚离地最高位置时前进方向的位移 $L_{m1} = 93\text{mm}$ 。

(2)周期步行阶段:步态周期 $T_{c2} = 3.6\text{s}$,步长 $D_{s1} = 90\text{mm}$,脚离地角度 $\beta = 10^\circ$,悬空脚离地时刻 $T_{l2} = 13.6\text{s}$,脚落地角度 $\gamma_2 = 0^\circ$,悬空脚离地最高位置 $H_{m2} = 83.37\text{mm}$ 、 $H_{m3} = 76.11\text{mm}$,悬空脚离地最高位置时前进方向的位移 $L_{m2} = 105.05\text{mm}$ 、 $L_{m3} =$

273.30mm 。

(3)收步阶段:步态周期 $T_{c3} = 2.4\text{s}$,步长 $D_{s3} = 87\text{mm}$,脚离地角度 $\beta = 10^\circ$,悬空脚离地时刻 $T_{l2} = 25.6\text{s}$,脚落地角度 $\gamma_2 = 10^\circ$,悬空脚离地最高位置 $H_{m4} = 74.27\text{mm}$,悬空脚离地最高位置时前进方向的位移 $L_{m4} = 285.05\text{mm}$ 。

将理论数据整合后写入控制程序,经实验(如图8所示)测得各方向关键时刻位移,利用 MATLAB 分别生成理论和实验的轨迹曲线,如图9-图12所示。在表1中分别列出了各方向关键时刻的位移数据对比,得出各个方向轨迹的相对误差。据表1和图9-图12对误差情况进行分析,得出如下出现误差的原因:

(1)系统存在一定的响应时间,与理论计算的运动状态存在 0.2s 左右的滞后现象。

(2)系统存在一定的结构间隙,导致系统运行状态与理论状态之间存在一定偏差。

综上,通过对比数据结果表明了该步态规划方法的正确性及高精度。

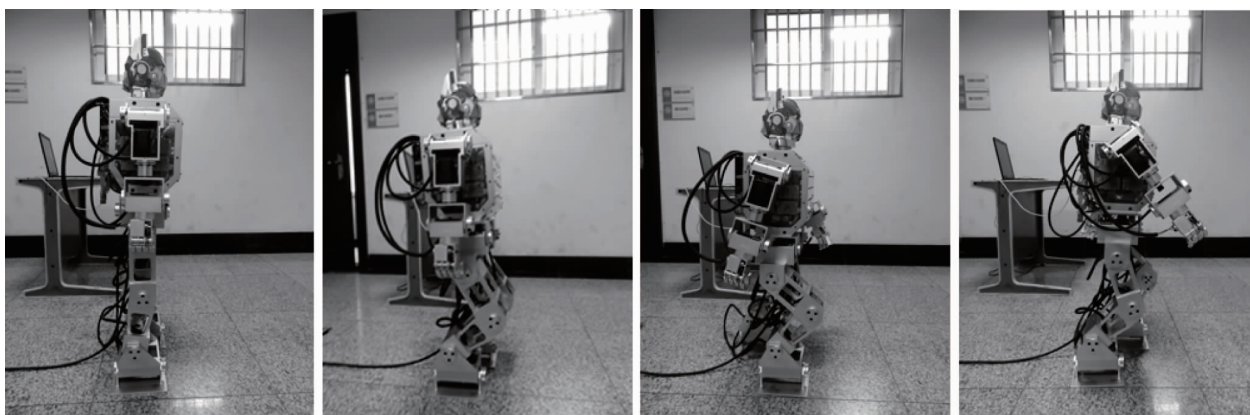


图8 实验图

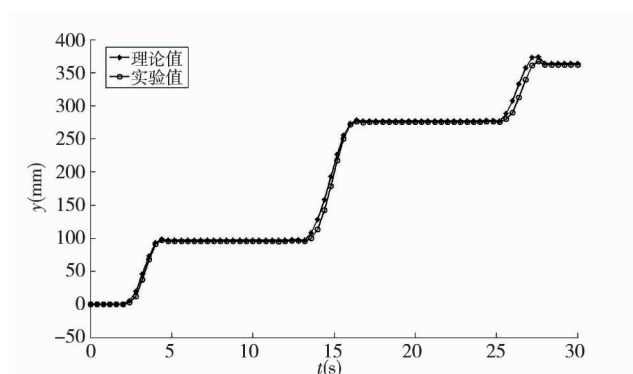


图9 脚踝前进方向运动轨迹

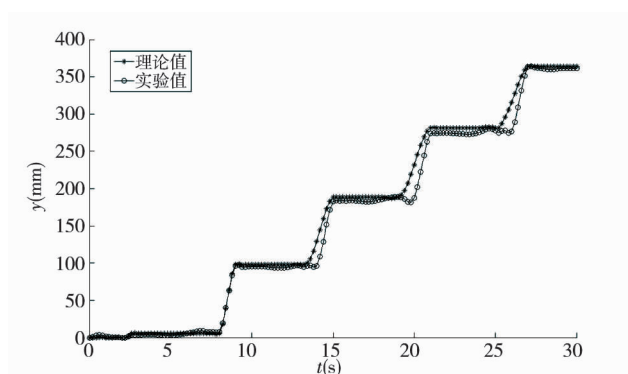


图10 腰板前进方向运动轨迹

表 1 关键时刻位移数据对比

毫米(mm)					
分类	时刻	理论值	实验值	相对误差	
脚踝 前进 关键 时刻	起步 阶段	T_{L1}	11.1	5.62	-49.37%
		T_{m1}	93	90.68	-2.49%
		T_{c1}	97	95.09	-1.97%
	周期步 行阶段	T_{L2}	108.1	100.20	-7.31%
		T_{m2}	273.3	271.35	-0.71%
		T_{c2}	277	274.97	-0.73%
	收步 阶段	T_{L3}	288.1	279.75	-2.90%
		T_{m3}	375.1	367.22	-2.10%
		T_{c3}	364	361.87	-0.59%
脚踝 上下 关键 时刻	起步 阶段	T_{L1}	71.88	63.74	-11.32%
		T_{m1}	76.13	76.14	0.01%
		T_{c1}	55	55.28	0.51%
	周期步 行阶段	T_{L2}	71.88	70.14	-1.03%
		T_{m2}	76.11	76.08	-0.04%
		T_{c2}	55	55	0%
	收步 阶段	T_{L3}	71.88	63.78	-11.27%
		T_{m3}	71.88	62.42	-13.16%
		T_{c3}	55	56.48	2.69%
腰部 前进 关键 时刻	起步 阶段	T_{L1}	5.55	3.81	-31.35%
		T_{m1}	5.55	4.12	-25.79%
		T_{c1}	5.55	4.87	-12.26%
	周期步 行阶段	T_{L2}	105.6	97.17	-7.98%
		T_{m2}	188.63	183.86	-2.53%
		T_{c2}	188.63	185.32	-1.75%
	收步 阶段	T_{L3}	291.73	278.28	-4.61%
		T_{m3}	364	362.13	-0.49%
		T_{c3}	364	360.34	-1.01%
腰部 左右 关键 时刻	起步 阶段	T_{L1}	-82.53	-76.47	-7.34%
		T_{m1}	-80.49	-84.01	0.60%
		T_{c1}	-84.68	-80.04	-5.48%
	周期步 行阶段	T_{L2}	-74.09	-68.24	7.90%
		T_{m2}	-80.26	-85.07	-5.99%
		T_{c2}	-84.62	-81.34	-3.88%
	收步 阶段	T_{L3}	-74.35	-70.75	-4.84%
		T_{m3}	-81.20	-80.12	-1.33%
		T_{c3}	-64.67	-79.15	22.39%

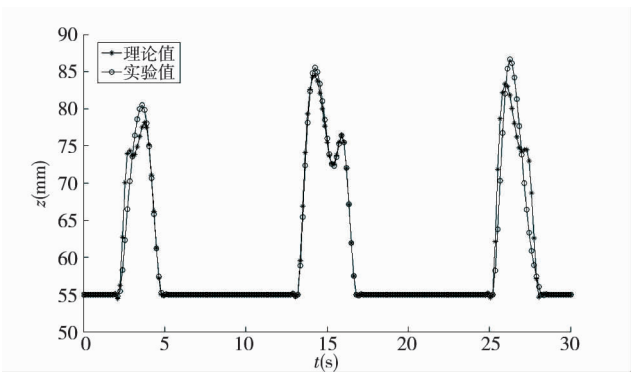


图 11 脚踝上下方向运动轨迹

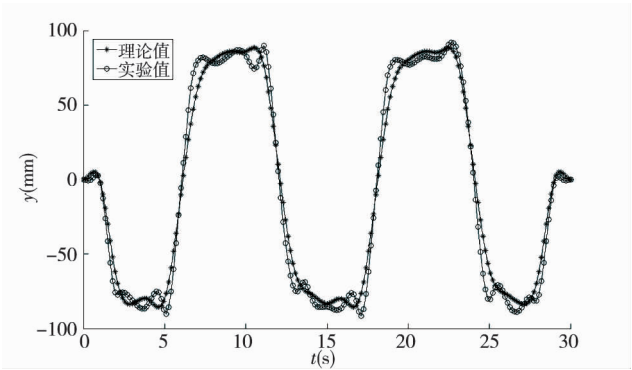


图 12 腰板左右方向运动轨迹

4 结 论

(1)提出一种基于单位圆法的仿人机器人行走系统步态规划方法。明确了关键部位的运动轨迹,简化了步态规划的分析过程。

(2)实验数据分析表明,该规划方法不仅具有合理性,满足仿人机器人直线运动的步态规划要求,而且为步态规划参数寻优提供了数学解析式,相比传统步态规划参数寻优方法寻优速度快,可为仿人机器人行走系统的步态控制提供参考依据。

(3)该规划方法适用于刚性脚底的仿人机器人,而仿人机器人实际行走过程脚底一般安装柔性缓冲装置,采用单位圆法进行步态规划将存在柔性变形误差,如何消除柔性误差对该算法的影响需要进一步深入研究。

参考文献

[1] 樊继壮,李立毅,朱延河等. 三肢体交叉步态运动规划. 高技术通讯,2012,22(11):1189-1194

[2] 张晓峰,俞志伟,张昊等. 基于 Matlab 的仿人壁虎机器人仿生步态规划与仿真. 高技术通讯,2011,21(2):

185-190

- [3] Huang Q, Yokoi K, Kajita S, et al. Planning Walking Patterns for a Biped Robot. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 2001, 17(3):280-289
- [4] Katija S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. A Realtime Pattern Generator for Biped Walking. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002, 1:31-37
- [5] 梶田秀司. 仿人机器人. 北京:清华大学出版社, 2007
- [6] 窦瑞军, 马培荪, 谢玲. 两足机器人步态的参数化设计及优化. *机械工程学报*, 2002, 38(4):36-39
- [7] 伊强, 陈恳, 刘莉等. 考虑综合步行约束的仿人机器人参数化 3D 步态规划方法. *机器人*, 2009, 31(4):342-350
- [8] 阮鹏, 俞志伟, 张昊等. 基于 ADAMS 的仿壁虎机器人步态规划及仿真. *机器人*, 2010, 32(4):499-504
- [9] 杨东超, 汪劲松, 刘莉等. 基于 ZMP 的拟人机器人步态规划. *机器人*, 2001, 23(6):504-508
- [10] 李敬, 黄强, 余张国等. 人体步行规律与仿人机器人步态规划. *中国科学:信息科学*, 2012, 42(9):1067-1080

Gait planning for the walking system of humanoid robots based on the unit circle method

Jiang Dawei, Hu Kongming, Zhang Bangcheng, Sun Jianwei, Zhang Hao

(School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012)

Abstract

Aiming at the computation complexity of the existing gait plannings for humanoid robots' walking system, a new gait planning method based on the unit circle method was proposed, and a study of a robot's gait planning was performed by using the method. A kinematic model for the walking system of the humanoid robot was established, and the unit circle method was applied to calculation of gait parameters of the beginning phases. In terms of the constraint conditions on the ground and the kinematic constraints, the constraint equations at the critical moment were created. A higher degree interpolation method was used to obtain walking gait curves in the system, and the relative error analysis and experiment were done according to the planning parameters. The experimental results demonstrate that the gait planning based on the unit circle method is correct, and this approach not only simplifies the gait planning process of humanoid robots, but also provides referential bases for the gait planning of humanoid robots.

Key words: humanoid robot, gait planning, unit circle method