

文章编号:1672-058X(2014)12-0042-07

基于最小二乘法的步态机器人运动轨迹辨识*

陈智勇, 张平改, 钱艳艳

(安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:运动轨迹辨识是机器人研究领域中的一个热点问题,运用最小二乘法对步态机器人的运动轨迹进行研究.测量并计算了人体步态特征参数;在此基础上,通过曲线拟合的方法,为下肢各个关节部位建立相对应的数学模型,得到了步态机器人运动轨迹的整体数学模型;最后,利用得到的数学模型表达式验证了文中所提研究方法的可行性与有效性.

关键词:步态机器人;运动轨迹;曲线拟合法;步态特征参数

中图分类号:TP242

文献标志码:A

自从机器人控制技术问世以来,其路径规划问题一直是一个热点^[1],许多研究人员在这个领域进行了大量的实验研究,并提出许多可行的方法.朱庆保^[2]等选用了最近邻居策略、目标导引函数和概率搜寻策略,提出利用栅格法对蚂蚁觅食路径进行建模,从而获得一条最好运动轨迹;庄晓东^[3]等参考了物体的运动和其位置的关系,提出了应用模糊概念建立动态的数学模型,从而构造出一种二维函数,最后通过模糊评价得出最佳运动轨迹;周郭许^[4]等提出应用栅格法建立一种数学模型,并用求迷宫最短路程的算法,来求得机器人的最佳运动轨迹;唐国新^[5]等在交叉算子的基础上,提出了一种改进的遗传算法,优化了在实际操作过程中遗传算子的进化效率,最终得到一条最佳的运动轨迹;周磊^[6]等针对路径长度相同,但直线路径消耗的能量要小一点的问题,提出了引入模糊算法的方法,对蚁群算法进行改进,组成一种混合算法对运动轨迹进行研究;何娟^[7]等结合了遗传算法与蚁群算法,提出了一种新型的遗传蚁群算法,先通过遗传算法得出初始运动轨迹分布,再采用蚁群算法求出其最优解,得到一条最佳运动轨迹;另外,冯治国^[8]等先利用拉格朗日法建立系统的运动模型,并设计了比例-微分反馈控制法,同时引入径向神经网络来减小误差,实现无偏差轨迹控制,得到机器人最佳运动轨迹.

以上文献中,研究人员应用了大量的不同方法对机器人路径运动轨迹进行研究,取得了一定得成果.此处将在以上研究的基础上,先通过对人体步态特征参数进行测量并计算,再通过曲线拟合的方法,为其建立相对应的数学模型,从而得到步态机器人的运动轨迹.

1 步态机器人动力学特性

步行运动是一个周期性的运动过程,由于两条腿的运动是交替进行的,所以以其中一条腿来进行运动轨迹的研究.一个完整的步态运动是由支撑相和摆动相两个部分组成的,支撑相期包括第一个双足支撑相、单足支撑相和第二个双足支撑相,它约占整个步态周期的 60%,其中双足支撑相约占 20%,单足支撑相约占 40%;而在摆

收稿日期:2014-04-17;修回日期:2014-05-05.

* 基金项目:国家大学生创新创业训练计划项目(201210363061).

作者简介:陈智勇(1991-),男,安徽芜湖人,从事机器人、智能控制系统等研究.

动相期间,一条腿与地面接触,另一条腿处于摆动的状态,它约占整个步态周期的 40%,步伐周期如图 1 所示。

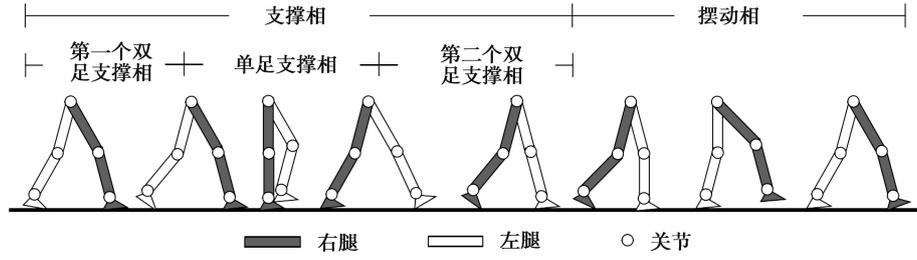


图 1 步伐周期图

在整个步态运动过程中,将下肢简化成如图 2 的模型,其中 A, B, C 3 点分别表示髋关节、膝关节、踝关节的转动中心, D 点表示脚趾。利用摄像机测得 A, B, C, D 等 4 点在不同时刻的空间位置,并记录下其坐标值,为后期的角度计算提供数据。

首先,建立下肢简化模型图的局部坐标系,将坐标系的 XOY 平面置于矢状面, X 轴正方向水平向右,如图 2 所示。此时,下肢模型的运动情况仅和 X, Y 坐标有关,与 Z 坐标无关。设 A, B, C, D 4 点的坐标分别为 $A(x_a, y_a, z_a), B(x_b, y_b, z_b), C(x_c, y_c, z_c), D(x_d, y_d, z_d)$, 相邻两个点的线段 $\overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}$ 长度分别为 l_{ab}, l_{bc}, l_{cd} , 髋关节角度值、膝关节角度值、踝关节角度值表示为 $\theta_{hip}, \theta_{knee}, \theta_{ankle}$, 则 A, B, C, D 4 点的运动关系表达式分别为

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} + l_{ab} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{hip}) \\ -\cos(\theta_{hip}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} + l_{bc} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{hip} - \theta_{knee}) \\ -\cos(\theta_{hip} - \theta_{knee}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} + l_{cd} \begin{bmatrix} \sin(\theta_{hip} - \theta_{knee} + \theta_{ankle}) \\ -\cos(\theta_{hip} - \theta_{knee} + \theta_{ankle}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

下肢模型相邻两个点之间的连线长度 l_{ab}, l_{bc}, l_{cd} 的计算公式为

$$\begin{cases} l_{ab} = \sqrt{(y_b - y_a)^2 + (x_b - x_a)^2} \\ l_{bc} = \sqrt{(y_c - y_b)^2 + (x_c - x_b)^2} \\ l_{cd} = \sqrt{(y_d - y_c)^2 + (x_d - x_c)^2} \end{cases} \quad (5)$$

将式(1)到式(5)联立起来进行方程的求解,得到髋关节角度 θ_{hip} 、膝关节角度 θ_{knee} 、踝关节角度 θ_{ankle} 的数学表达式分别为

$$\begin{aligned} \theta_{hip} &= -\arctan\left(\frac{x_b - x_a}{y_b - y_a}\right) \\ \theta_{knee} &= -\arctan\left(\frac{x_b - x_a}{y_b - y_a}\right) + \arctan\left(\frac{x_c - x_b}{y_c - y_b}\right) \\ \theta_{ankle} &= \arctan\left(\frac{x_c - x_b}{y_c - y_b}\right) - \arctan\left(\frac{x_d - x_c}{y_d - y_c}\right) \end{aligned}$$

将 4 个点的坐标值 $A(x_a, y_a, z_a), B(x_b, y_b, z_b), C(x_c, y_c, z_c), D(x_d, y_d, z_d)$, 代入 $\theta_{hip}, \theta_{knee}, \theta_{ankle}$ 的表达式中,即可得到髋关节角度 θ_{hip} 、膝关节角度 θ_{knee} 和踝关节角度 θ_{ankle} 的值。

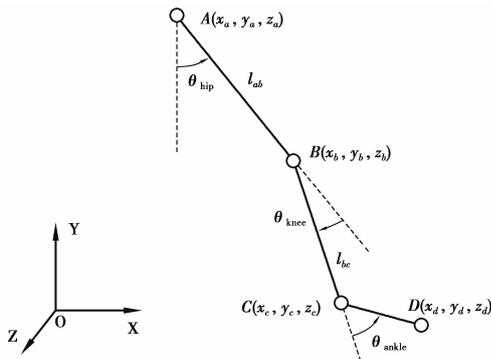


图 2 下肢简化模型图

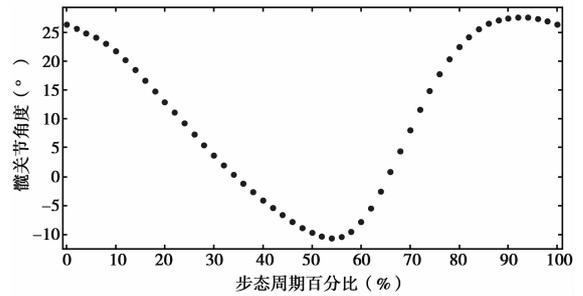


图 3 髋关节的角度数据

2 步态机器人特征参数辨识

上述测得的步态特征参数是离散的,不能直接用来进行步态机器人运动轨迹的研究,还需通过数学方法来建立相对应的数学模型.此处应用最小二乘法来建立数学模型,并通过 MATLAB 拟合出来一条近似的曲线,能反映测量数据的变化趋势,可以最大程度排除随机误差的干扰,得到一个比较精确的数学模型.

2.1 髋关节角度特征模型

髋关节在一个周期内的角度数据变化规律如图 3 所示,从图中可以看出,髋关节在一个周期内先下降后上升,其中出现了一个波谷,所以可以选用正弦函数、余弦函数和常数组组合在一起,通过 3 者的叠加构造一种傅里叶函数实现曲线的拟合.髋关节的角度数学模型通式为

$$\theta_{hip} = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) + a_3 \cos(3xw) + b_3 \sin(3xw)$$

其中, θ_{hip} 表示髋关节角度; x 表示步态周期的百分比,取值范围为 $[0, 100]$; $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3, w$ 为髋关节拟合曲线方程系数.

按照髋关节的角度数学模型通式进行曲线拟合,在 MATLAB 中进行运算可以得到如图 4 所示的拟合曲线和如表 1 所示的拟合系数值.从图 4 中可以看出,用傅里叶函数拟合出来的曲线跟随角度的变化而变化,能符合角度的变化规律.

将表 1 拟合出来的系数代入髋关节角度数学模型通式中,可以得到其模型数学表达式为

$$\theta_{hip} = 10.13 + 18.51 \cos(0.06257x) - 3.119 \sin(0.06257x) - 2.135 \cos(0.12514x) - 2.335 \sin(0.12514x) - 0.3228 \cos(0.18771x) + 1.269 \sin(0.18771x)$$

为了验证髋关节拟合曲线的结果,现在利用最小二乘法对其残差进行计算,并通过 MATLAB 运行,可得到如图 5 所示的拟合曲线残差图和如表 2 所示的残差系数值.

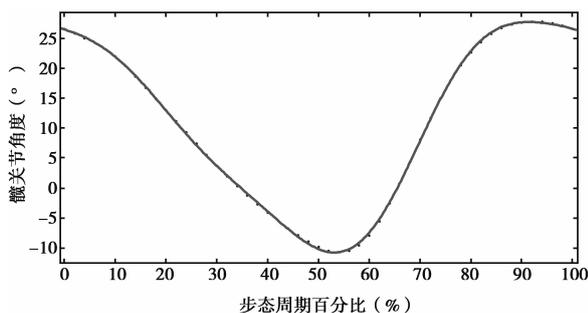


图 4 髋关节的拟合曲线

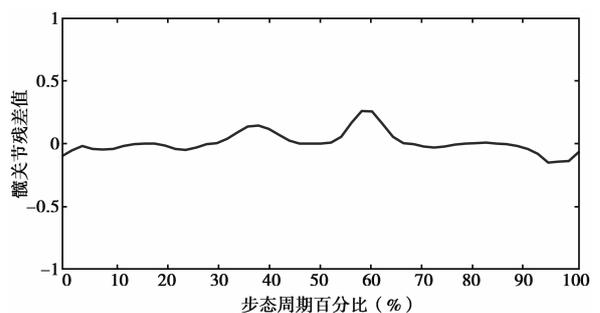


图 5 髋关节拟合曲线的残差

表 1 髌关节的拟合系数值

系数项	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	w
系数值	10.13	18.51	-3.119	-2.135	-2.335	-0.322 8	1.269	0.062 57

表 2 髌关节残差系数值

系数项	和方差	确定系数	标准误差	标准差
系数值	2.217	0.999 8	0.999 7	0.227 1

从图 5 所示的髌关节拟合曲线的残差可以看出,拟合出来的曲线的残差在负 0.15 与 0.3 之间波动,残差比较小,能符合拟合的要求.从表 2 所示的髌关节残差系数值可以看出,残差的标准差为 0.227 1,标准误差为 0.999 7,符合标准差不超过 1.5,标准误差不超过 1 的要求.

2.2 膝关节角度特征模型

膝关节在一个周期内的角度数据变化如图 6 所示,从图 6 中可以看出,膝关节在一个周期内上下起伏两次,其中出现了一个波谷、两个波峰,所以可以选用正弦函数、余弦函数和常数组合在一起,通过 3 者的叠加构造一种傅里叶函数实现曲线的拟合.膝关节的角度数学模型通式为

$$\theta_{knee} = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw) + a_2 \cos(2xw) + b_2 \sin(2xw) + a_3 \cos(3xw) + b_3 \sin(3xw)$$

其中, θ_{knee} 表示膝关节角度; x 表示步态周期的百分比,取值范围为 $[0, 100]$; $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3, w$ 为膝关节拟合曲线方程的系数.

按照膝关节的角度数学模型通式进行曲线拟合,在 MATLAB 中进行运算可以得到如图 7 所示的拟合曲线和如表 3 所示的拟合系数值.从图 7 中可以看出拟合出来的曲线跟随角度的变化而变化,能符合角度的变化规律.

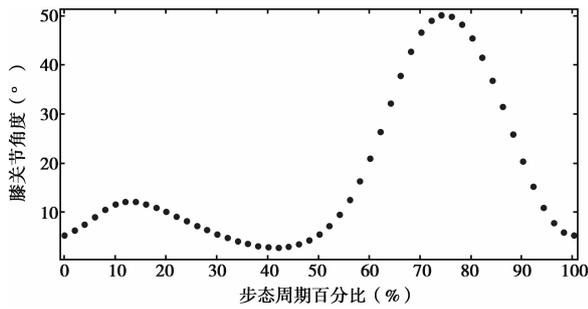


图 6 膝关节的角度数据

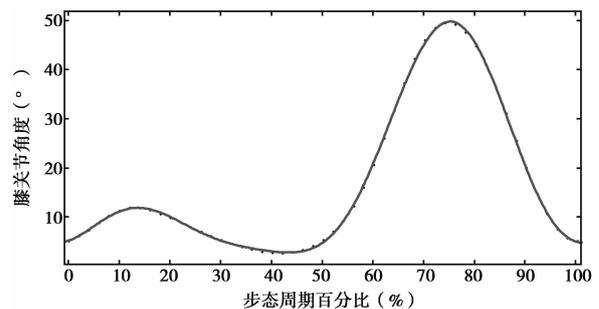


图 7 膝关节的拟合曲线

表 3 膝关节的拟合系数值

系数项	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	w
系数值	17.13	-1.115	-17.12	-11.18	5.587	0.622 8	3.938	0.060 96

将表 3 拟合出来的系数值代入膝关节角度数学模型通式中,可以得到其模型数学表达式为

$$\theta_{knee} = 17.13 - 1.115 \cos(0.060 96x) - 17.12 \sin(0.060 96x) - 11.18 \cos(0.121 92x) + 5.587 \sin(0.121 92x) + 0.622 8 \cos(0.182 88x) + 3.938(0.182 88x)$$

为了验证膝关节拟合曲线的结果,现在利用最小二乘法对其残差进行计算,并通过 MATLAB 运行,得到如图 8 所示的拟合曲线残差图和如表 4 所示的残差系数值.

表 4 膝关节残差系数值

系数项	和方差	确定系数	标准误差	标准差
系数值	4.528	0.999 6	0.999 6	0.324 5

从图 8 所示的膝关节拟合曲线的残差可以看出,拟合出来的曲线的残差在负 0.25 与 0.25 之间波动,残差比较小能符合拟合的要求.从表 4 所示的膝关节残差系数值可以看出,残差的标准差为 0.324 5,标准误差为 0.999 6,符合标准差不超过 1.5,标准误差不超过 1 的要求.

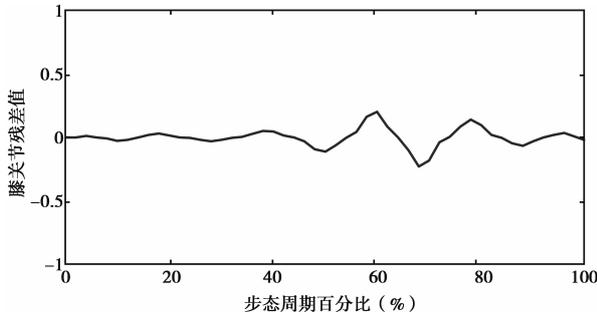


图 8 膝关节拟合曲线的残差

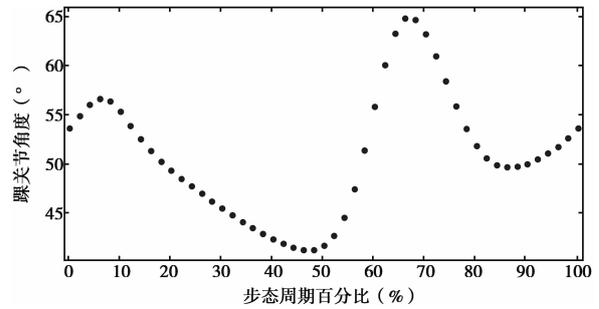


图 9 踝关节的角度数据

2.3 踝关节角度特征模型

踝关节在一个周期内的变化趋势如图 9 所示,从图中可以看出,踝关节在一个周期内出现了两个波峰与两个波谷,它的变化趋势是先上升后下降,然后再上升后下降,最后上升,所以可以选用 5 个高斯函数组合在一起,通过叠加来实现曲线的拟合.踝关节的角度数学模型通式为

$$\theta_{\text{ankle}} = a_1 * e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 * e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 * e^{-\left(\frac{x-b_3}{c_3}\right)^2} + a_4 * e^{-\left(\frac{x-b_4}{c_4}\right)^2} + a_5 * e^{-\left(\frac{x-b_5}{c_5}\right)^2}$$

其中, θ_{ankle} 表示踝关节的角度; x 表示步态周期的百分比,取值范围为 $[0, 100]$; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3, a_4, b_4, c_4, a_5, b_5, c_5$ 为踝关节拟合曲线方程系数.

按照踝关节的模型通式进行曲线拟合,在 MATLAB 中进行运算可以得到如图 10 所示的拟合曲线和如表 5 所示的拟合系数值.从图 10 中可以看出拟合出来的曲线跟随角度的变化而变化,能符合角度的变化规律.

表 5 踝关节的拟合系数值

系数项	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	c_3
系数值	12.99	64.17	8.209	4.412	6.717	6.989	78.02	197.2	157.7
系数项	a_4	b_4	c_4	a_5	b_5	c_5			
系数值	12.67	70.49	10.76	35.66	-2.467	42.98			

将表 5 的拟合出来的踝关节系数值代入模型通式,可以得到踝关节角度模型的数学表达式

$$\theta_{\text{ankle}} = 12.99 * e^{-\left(\frac{x-64.17}{8.209}\right)^2} + 4.412 * e^{-\left(\frac{x-6.717}{6.989}\right)^2} + 78.02 * e^{-\left(\frac{x-197.2}{157.7}\right)^2} + 12.67 * e^{-\left(\frac{x-70.49}{10.76}\right)^2} + 35.66 * e^{-\left(\frac{x+2.467}{42.98}\right)^2}$$

为了验证踝关节拟合曲线的结果,现在利用最小二乘法对其残差进行计算,并通过 MATLAB 运行,可得到如图 11 所示的拟合曲线残差图和如表 6 所示的残差系数值.

表 6 踝关节残差系数值

系数项	和方差	确定系数	标准误差	标准差
系数值	0.173 6	0.999 9	0.999 9	0.069 45

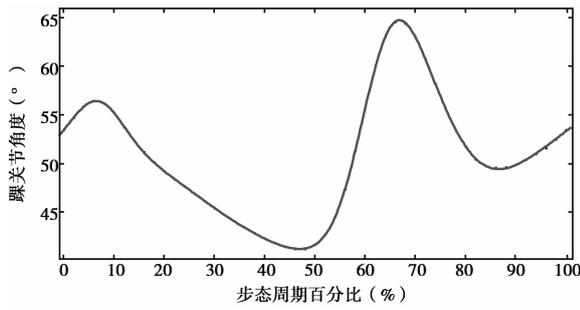


图 10 踝关节的拟合曲线

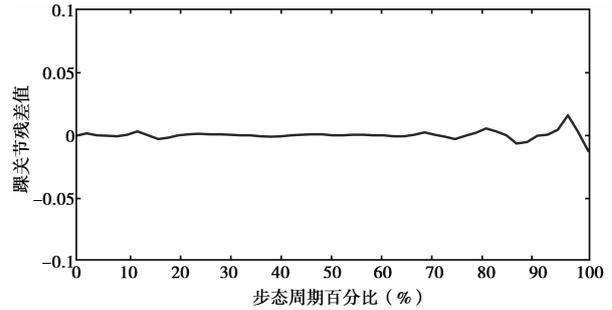


图 11 踝关节拟合曲线的残差

从图 11 所示的踝关节拟合曲线的残差可以看出,拟合出来的曲线残差在负 0.015 与 0.02 之间波动,残差比较小,能符合拟合的要求.从表 6 所示的踝关节残差系数值可以看出,残差的标准差为 0.069 45,标准误差为 0.999 9,符合标准差不超过 1.5,标准误差不超过 1 的要求.

3 实验验证

通过上述拟合曲线法构建出来的数学模型,可以得到的髋关节角度 θ_{hip} ,膝关节角度 θ_{knee} ,踝关节角度 θ_{ankle} 的数学表达式分别为

$$\theta_{hip} = 10.13 + 18.51\cos(0.06257x) - 3.119\sin(0.06257x) - 2.135\cos(0.12514x) - 2.335\sin(0.12514x) - 0.3228\cos(0.18771x) + 1.269\sin(0.18771x)$$

$$\theta_{knee} = 17.13 - 1.115\cos(0.06096x) - 17.12\sin(0.06096x) - 11.18\cos(0.12192x) + 5.587\sin(0.12192x) + 0.6228\cos(0.18288x) + 3.938(0.18288x)$$

$$\theta_{ankle} = 12.99 * e^{-\left(\frac{x-64.17}{8.209}\right)^2} + 4.412 * e^{-\left(\frac{x-6.717}{6.989}\right)^2} + 78.02 * e^{-\left(\frac{x-197.2}{157.7}\right)^2} + 12.67 * e^{-\left(\frac{x-70.49}{10.76}\right)^2} + 35.66 * e^{-\left(\frac{x+2.467}{42.98}\right)^2}$$

为了验证该方法的可行性,现随机选取 x 等于 20,60 和 80,带入上述髋关节、膝关节以及踝关节的数学表达式中,可以得到如表 7 所示的角度值.将计算出来的角度值与表 8 所示实验测出的角度值进行比较,可以发现两者的差值不大,所以通过上述基于最小二乘法来进行步态机器人运动轨迹辨识的方法是可行的,并且实验构建的数学模型函数相对比较精确,标准差和标准误差都较小,有利于进一步来分析与研究.

表 7 建立的模型表达式计算出的值 (°)

	髋关节的角度	膝关节的角度	踝关节的角度
$x=20$	12.837	10.329 3	49.326 3
$x=60$	-7.449 9	21.655	55.846 8
$x=80$	22.593 9	45.787 2	51.923 9

表 8 实验测出的值 (°)

	髋关节的角度	膝关节的角度	踝关节的角度
$x=20$	12.9	10.15	49.33
$x=60$	-7.87	21.02	55.85
$x=80$	22.39	45.35	51.82

4 总 结

在对步态机器人运动轨迹研究的基础上,运用最小二乘法来完成其最优运动轨迹辨识.在研究之前,先对人体步态特征参数进行测量并计算关系式,再通过曲线拟合的方法,为各个运动环节的轨迹建立相应数学模型,最后得出整个运动轨迹系统的数学模型.实验结果表明,文中方法对研究步态机器人运动轨迹具有误差小并且比较精确的特点.

参考文献:

- [1] 贺玲玲. 移动机器人空间姿态测量系统研究与设计[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 129(9): 38-42
- [2] 朱庆保, 张玉兰. 基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J]. 机器人, 2005, 27(2): 132-136
- [3] 庄晓东, 孟庆春, 殷波, 等. 动态环境中基于模糊概率的机器人路径搜索方法[J]. 机器人, 2006(21): 197-199
- [4] 周郭许, 唐西林. 基于栅格模型的机器人路径规划快速算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 32(7): 104-107
- [5] 唐国新, 陈雄, 袁杨. 基于改进遗传算法的机器人路径规划[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(18): 4446-4449
- [6] 周磊, 王华忠. 改进蚁群算法在机器人路径规划中的应用研究[D]. 华东理工大学, 2012
- [7] 何娟, 涂中英, 牛玉刚. 一种遗传蚁群算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 170-174
- [8] 冯治国, 钱晋武. 步行康复训练助行腿机器人系统[D]. 上海大学, 2009
- [9] NIXON M S, TAN T N, CHELLAPPA R. Human Identification Based on Gait [M]. New York: Springer, 2005
- [10] VAUGHAN C L, DAVIS B L, O'CONNOR J C. Dynamic of Human Gait [M]. Cape Town: Kiboho Publishers, 1999
- [11] 王企远, 钱晋武. 步行康复训练机器人助行腿的步态规划与运动控制[D]. 上海大学, 2011

Trajectory Identification of Gait Robot Movement Based on Least Square Method

CHEN Zhi-yong, ZHANG Ping-gai, QIAN Yan-yan

(School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Anhui Wuhu 241000, China)

Abstract: Movement trajectory identification is a hot topic in robot research field, this paper uses least square method to study the movement trajectory of the gait robots, measures and calculates the characteristic parameters of human gait, based on this, uses curve fitting method to set up the corresponding mathematical models for each joint position of lower limbs, receives the overall mathematical model of gait robot movement trajectory, and finally uses the received mathematical model formula to prove the feasibility and validity of the research methods held by this paper.

Key words: gait robot; movement trajectory; curve fitting method; gait characteristic parameter

责任编辑: 李翠薇