



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103149933 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201310060399. 8

(第 6 期),

(22) 申请日 2013. 02. 27

于国晨等. 基于三维线性倒立摆的仿人机器人步态规划. 《计算机应用》. 2012, 第 32 卷 (第 9 期),

(73) 专利权人 南京邮电大学

地址 210003 江苏省南京市鼓楼区新模范马路 66 号

梁志伟等. 基于加强学习的类人机器人步行参数设计. 《中国自动化学会控制理论专业委员会 B 卷》. 2011,

(72) 发明人 刘娟 梁志伟 郝越 朱松豪

(74) 专利代理机构 南京正联知识产权代理有限公司 32243

审查员 赵萌

代理人 王素琴

(51) Int. Cl.

G05D 1/02(2006. 01)

(56) 对比文件

EP 1084943 A2, 2001. 03. 21,

CN 101751037 A, 2010. 06. 23, 全文.

CN 101847009 A, 2010. 09. 29,

王唯翔. 基于三维线性倒立摆的双足机器人步态规划. 《计算机技术与发展》. 2011, 第 21 卷

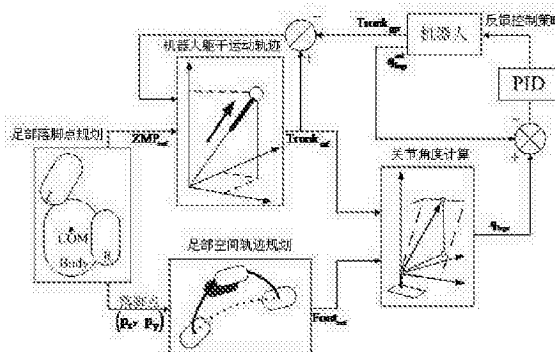
权利要求书5页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法

(57) 摘要

本发明提供一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法,包括足部落脚点规划、机器人躯干运动轨迹、足部空间轨迹规划、关节角度计算和反馈控制策略,首先规划出机器人足部在二维空间下的落脚点并计算出机器人的零力矩点 ZMP 值;由 ZMP 值建立带预测控制的双线性倒立摆模型并得到机器人躯干的参考位姿;由规划得出的落脚点使用三次样条插值法,得出每两个落脚点在三维空间中的最佳运行轨迹,即可获得足部参考位姿;由上述得出躯干和足部的参考位姿利用逆运动学知识计算出机器人各个关节的角度。本发明在仿人行走过程中,利用闭环控制实现机器人的全向行走。相比现有技术,本发明的机器人行走方法具有鲁棒性强、稳定性好的优点。



1. 一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法,其特征在於:包括足部落脚点规划、机器人躯干运动轨迹、足部空间轨迹规划、关节角度计算和反馈控制策略,

步骤一,足部落脚点规划:采用蚁群算法进行路径规划得出机器人足部在二维空间下的落脚点,并计算出机器人的零力矩点 ZMP 值;足部落脚点规划包括以下步骤:

步骤 a,通过指定移动路径上的落脚点的方法来规划每一步,确定每步的步长 $s_x^{(n)}$ 、步宽 $s_y^{(n)}$ 和转向角度 $\theta^{(n)}$;所述步骤 a 中的落脚点的规划为:

将 $(s_x^{(n)}, s_y^{(n)}, \theta^{(n)})$ 称之为步行参数,第 n 个落脚点 $p^{(n)}$ 在 X-Y 平面上可用 $(p_x^{(n)}, p_y^{(n)})$ 表示:

$$\begin{pmatrix} p_x^{(n)} \\ p_y^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x^{(n-1)} \\ p_y^{(n-1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_\theta^{(n)} & -s_\theta^{(n)} \\ s_\theta^{(n)} & c_\theta^{(n)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_x^{(n)} \\ -(-1)^n s_y^{(n)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式 (1) 中, $s_x^{(n)}$ 表示前进方向即 X 轴方向上的步长, $s_y^{(n)}$ 表示侧移方向即 Y 轴方向上的步宽, $\theta^{(n)}$ 表示踏足与 X 轴的夹角,上标 (n) 均表示是第 n 步, $n = 0, 1, 2, \dots, N$; $c_\theta^{(n)} = \cos \theta^{(n)}$, $s_\theta^{(n)} = \sin \theta^{(n)}$, 是第 n 步的转向角 θ 的余弦和正弦值; $(p_x^{(0)}, p_y^{(0)})$ 为第一个支撑脚的位置,式 (1) 中步行开始时是左脚,如果开始步行的是右脚,则将式 (1) 中 $-(-1)^n$ 改为 $(-1)^n$;

步骤 b,确定由当前位置到目标点移动过程中所有落脚点在 X-Y 平面上的位置;

步骤 c,相对于第 n-1 步而言第 n 步的位置,可由第 n 步的步长 $s_x^{(n)}$ 、步宽 $s_y^{(n)}$ 和转向角度 $\theta^{(n)}$ 来确定,并计算出第 n 步的终止速度;

步骤二,机器人躯干运动轨迹:由步骤一得出的 ZMP 值建立带预测控制的双线性倒立摆模型并得到机器人躯干的参考位姿;

步骤三,足部空间轨迹规划:由步骤一的足部落脚点规划得出的落脚点使用三次样条插值法,得出每两个落脚点在三维空间中的最佳运行轨迹,即可获得足部参考位姿;

步骤四,关节角度计算:由步骤二、步骤三得出躯干和足部的参考位姿利用逆运动学知识计算出机器人的膝盖处的关节角,踝关节的滚动角和俯仰角,股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角;

步骤五,反馈控制策略:采用 PID 控制算法精确各个关节角度值并应用于实体机器人,由陀螺仪传感器信息值计算出机器人行走过程中的真实躯干位置,并与双线性倒立摆结合形成反馈控制,形成对整个行走过程的闭环控制。

2. 如权利要求 1 所述的基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法,其特征在於,所述步骤 c 中的第 n 步的终止速度计算如下:

机器人的质心 COM 的运动轨迹在 X-Y 平面上的投影是一段关于 y 轴对称的双曲线,该双曲线在第一象限的 x 和 y 坐标值即是一个步行单元 $(\bar{x}^{(n)}, \bar{y}^{(n)})$:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}^{(n)} \\ \bar{y}^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_s^{(n+1)} & -s_s^{(n+1)} \\ s_s^{(n+1)} & c_s^{(n+1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_x^{(n+1)}/2 \\ (-1)^n s_y^{(n+1)}/2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

则第 n 步的步行单元的终止速度 $(\bar{v}_x^{(n)}, \bar{v}_y^{(n)})$ 可表示为：

$$\begin{pmatrix} \bar{v}_x^{(n)} \\ \bar{v}_y^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_s^{(n+1)} & -s_s^{(n+1)} \\ s_s^{(n+1)} & c_s^{(n+1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1+C)/(T_s) \bar{x}^{(n)} \\ (1-C)/(T_s) \bar{y}^{(n)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式 (3) 中 T_s 为每步的支撑时间, z_c 为机器人的质心 COM 在 z 轴上的高度, g 为重力常量, T_s 、 z_c 、 g 三者均为给定值; 记 $T_c = \sqrt{z_c/g}$, $C = \cosh(T_s/T_c)$, $S = \sinh(T_s/T_c)$ 。

3. 如权利要求 1 所述的基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法, 其特征在于, 所述步骤二中的机器人躯干运动轨迹包括以下步骤:

步骤 a, 利用步骤一得出的 ZMP 值建立带预测控制的双线性倒立摆系统, 利用采样时间 t 对质心和 ZMP 的轨迹进行三次多项式离散化, 并进行 N 次迭代计算;

步骤 b, 让双线性倒立摆系统的输出尽可能准确地跟踪目标 ZMP 参考轨迹, 考虑使跟踪性能指标极小化的问题, 假定机器人的躯干即是质心, 最后得出机器人质心 COM 的运动轨迹, 即得出机器人躯干的参考位姿 $Trunk_{ref}$ 。

4. 如权利要求 3 所述的基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法, 其特征在于, 所述步骤二中的机器人躯干运动轨迹计算如下:

由步骤一足部落脚点规划得出的机器人的零力矩点 ZMP 的值为:

$$x_{ZMP} = x_{COM} - (\ddot{x}_{COM} \times z_c) / g \quad (4)$$

式 (4) 中, x_{COM} 和 z_c 分别表示机器人的质心 COM 沿 x 轴方向上的位移和在 z 轴上的高度, \ddot{x}_{COM} 为机器人的质心沿 x 轴方向上的加速度, x_{ZMP} 为 ZMP 在 x 轴方向上的值;

将该模型分解为前进和侧移两个方向, 即 X-Z 和 Y-Z 两个部分, 则这两个部分是完全相同的, 所以称为双线性倒立摆;

在 X-Z 平面中, 利用采样时间 t 对质心和 ZMP 的轨迹进行三次多项式离散化:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{COM}(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & t & t^2/2 \\ 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{X}_{COM}(k) + \begin{pmatrix} t^3/6 \\ t^2/2 \\ t \end{pmatrix} \ddot{x}_{COM}(k) \\ x_{ZMP}(k) = (1 - z_c/g) \mathbf{X}_{COM}(k) \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 中, $\mathbf{x}_{\text{COM}}(k) = (x_{\text{COM}}(kt), \dot{x}_{\text{COM}}(kt), \ddot{x}_{\text{COM}}(kt))^T$, 其中 $x_{\text{COM}}(kt)$ 、 $\dot{x}_{\text{COM}}(kt)$ 和 $\ddot{x}_{\text{COM}}(kt)$ 分别表示 kt 时刻质心沿 x 轴的位移量、速度和加速度; $\ddot{x}_{\text{COM}}(k) = \ddot{x}_{\text{COM}}(kt)$ 表示机器人的质心沿 x 轴的加速度对时间的微分, 作为双线性倒立摆系统在 kt 时刻的输入; $x_{\text{ZMP}}(k) = x_{\text{ZMP}}(kt)$ 表示在 kt 时刻 ZMP 的 x 坐标值;

使用预观控制的方法, 利用 COM 轨迹预测出 ZMP 轨迹, 同时使用 ZMP 轨迹的 N 个样本点值来计算当前 COM 值; 上述问题采用二次规划 QP 来解决, 即为了让双线性倒立摆系统的输出 $x_{\text{ZMP}}(k)$ 尽可能准确地跟踪 ZMP 的参考轨迹值 $\mathbf{x}_{\text{ZMP}}^{\text{ref}}(k)$, 考虑一个使跟踪性能指标极小化的问题, 最后得出机器人质心 COM 的运动轨迹。

5. 如权利要求 1 所述的基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法, 其特征在于, 所述步骤三中的足部空间轨迹规划为使用三次样条插值法来确定足部轨迹, 也就是踝关节的轨迹, 即能得到足部每个时刻运动位置 Foot_{ref} 。

6. 如权利要求 1 所述的基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法, 其特征在于, 所述步骤四中的关节角度计算为由步骤二和步骤三得出的躯干和足部的参考位姿 $\text{Trunk}_{\text{ref}}$ 和 Foot_{ref} , 计算出膝盖处的关节角, 踝关节的滚动角和俯仰角, 股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角;

所述膝盖处的关节角, 踝关节的滚动角和俯仰角, 股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角计算如下:

由倒立摆模型和足部轨迹模块得出的躯干和足部的参考位姿 $\text{Trunk}_{\text{ref}}$ 和 Foot_{ref} , 可推出机器人自身的局部坐标系下理想的足部位置及其朝向, 并用齐次变换矩阵来描述, 记为 $\mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{Local}}$; 接着表示相对于股关节滚动角 HipR 坐标系下的足部位置:

$$\mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{HipR}} = \mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{Local}} \times \text{Rot}_x(\pi/4) \times \text{Trans}_y(l_{\text{dist}}/2) \quad (6)$$

式 (6) 中, l_{dist} 为两条腿之间的距离, $\text{Rot}_A(B)$ 、 $\text{Trans}_A(B)$ 分别表示 B 沿着 A 轴的旋转和平移;

机器人的膝盖以及腿部肢体构成了一个三角形结构, 其中的两边长为机器人的大腿 A 和小腿 B 的长度, 第三边的长度就是 $\mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{HipR}}$ 的平移矢量 $\vec{r}(r_x, r_y, r_z)$ 的长度, 即踝关节与股关节之间的距离 C :

$$C = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad (7)$$

$$\text{而又 } C^2 = A^2 + B^2 - 2 \times A \times B \times \cos \gamma \quad (8)$$

式 (8) 中 γ 是大腿和小腿之间的夹角, 所以膝盖处的关节角为:

$$q_{\text{Knee}} = \pi - \gamma = \pi - \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 - C^2}{2 \times A \times B}\right) \quad (9)$$

踝关节的滚动角和俯仰角分别为:

$$q_{\text{AnkleR}} = a \tan 2(r_y, r_z) \quad (10)$$

$$q_{\text{AnkleP}} = a \tan 2(r_x, \sqrt{r_y^2 + r_z^2}) - \arccos \frac{B^2 + C^2 - A^2}{2 \times B \times C} \quad (11)$$

再求取股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角, 由于:

$$\mathbf{M}_{\text{HipR}}^{\text{Thigh}} = \left(\mathbf{M}_{\text{Thigh}}^{\text{Foot}} \right)^{-1} \times \left(\mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{HipR}} \right)^{-1} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{Thigh}}^{\text{Foot}} = & \mathbf{Rot}_x(q_{\text{AnkleR}}) \times \mathbf{Rot}_y(q_{\text{AnkleP}}) \times \mathbf{Trans}_z(B) \\ & \times \mathbf{Rot}_y(q_{\text{Knee}}) \times \mathbf{Trans}_z(A) \end{aligned} \quad (13)$$

式 (12)、(13) 中, $\mathbf{M}_{\text{Thigh}}^{\text{Foot}}$ 是相对于足部而言其腿部位置的齐次变换矩阵, $\mathbf{M}_{\text{HipR}}^{\text{Thigh}}$ 是相对于腿部坐标系而言其股关节滚动角位置的齐次变换矩阵;

然而由股关节的偏摆角 q_{HipY} 、滚动角 q_{HipR} 和俯仰角 q_{HipP} 可以推出:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{HipR}}^{\text{Thigh}} = & \mathbf{Rot}_z(q_{\text{HipY}}) \times \mathbf{Rot}_x(q_{\text{HipR}}) \times \mathbf{Rot}_y(q_{\text{HipP}}) \\ = & \begin{pmatrix} c_y c_z - s_x s_y s_z & -c_x s_z & c_z s_y + c_y s_x s_z \\ c_y s_z + c_z s_x s_y & c_x c_z & s_y s_z - c_y c_z s_x \\ -c_x s_y & s_x & c_x c_y \end{pmatrix} \\ = & \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

式 (14) 中, $c_x = \cos q_{\text{HipR}}$, $s_x = \sin q_{\text{HipR}}$ 表示股关节滚动角的余弦和正弦值;

$c_y = \cos q_{\text{HipP}}$, $s_y = \sin q_{\text{HipP}}$ 表示股关节俯仰角的余弦和正弦值;

$c_z = \cos q_{\text{HipY}}$, $s_z = \sin q_{\text{HipY}}$ 表示股关节偏摆角的余弦和正弦值;

这样就可以计算出股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角分别:

$$q_{\text{HipY}} = a \tan 2(-R_{12}, R_{22}) \quad (15)$$

$$q_{\text{HipR}} = a \tan 2(R_{32}, -R_{12} s_z + R_{22} c_z) = \arcsin R_{32} \quad (16)$$

$$q_{\text{HipP}} = a \tan 2(-R_{31}, R_{33}) \quad (17)$$

7. 如权利要求 1 所述的基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法, 其特征在于: 所述步骤五中的反馈控制策略包括关节角控制和躯干控制,

所述关节角控制为采用 PID 控制算法控制膝盖处的关节角, 踝关节的滚动角和俯仰角, 股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角;

所述躯干控制中, 由机器人各个部位传感器的值计算出其躯干位置, 在动态行走模型中, 闭环控制需要考虑机器人躯干位置的误差 $\text{Trunk}_{\text{error}}$; 由于机器人的腿关节存在机械反冲力, 而用对关节角的 PID 控制又无法消除该反冲力, 这就给躯干误差值的准确计算带来了一定难度; 在行走过程中, 机器人的膝盖总是弯曲的, 只要膝关节在其反冲力范围内就不会产生振荡, 所以认为躯干位置的误差值就是由该机械反冲力造成的; 躯干的误差值记为参考值与实际值之间的差 $\text{Trunk}_{\text{error}} = \text{Trunk}_{\text{ref}} - \text{Trunk}_{\text{gyr}}$, 用以修正倒立摆模型原本的输出值 $\text{Trunk}_{\text{ref}}$, 从而形成整个行走过程的闭环控制。

8. 如权利要求 7 所述的基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法, 其特征在于: 所述

躯干控制中,在实际执行过程中考虑 50%的传感器 $\text{Trunk}_{\text{gyr}}$ 的信息。

基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法

技术领域

[0001] 本发明属于仿人机器人行走技术领域,具体涉及一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法。

背景技术

[0002] 现实世界中最早出现的仿人机器人应该首推 1973 年早稻田大学加藤一郎研究室开发的 WABOT-1。尽管技术还不是很成熟, WABOT-1 却既能通过视觉识别物体,也能通过听觉和语音合成与人进行言语交流,还能通过有触觉的双手队物体进行操作,能够用双足行走。随后又有令人惊叹的 P2、P3、ASIMO 的问世,到 2008 年 NAO 的出现,仿人机器人的各方面技术在不断地更新。

[0003] 在仿人机器人行走方面,也有其它一些方法,如 S. Kajita 的规划关节轨迹的方法,分析一个行走周期内踝关节和髋关节在各个状态下的位置和角度值,这些特征点被描述出来后再确定关节运动的连续曲线。该方法计算量大也很依赖于外界环境双线性倒立摆系统,对于自由度越多的机器人,其动态等式有时甚至是不可解的 ;S. Grillner 的中心双线性倒立摆系统生成器,是基于神经网络的分析方法,由非振荡信号进行初始化,再以自包含的方法产生周期性信号的回路双线性倒立摆系统。该方法无需对机器人和外界环境进行动态双线性倒立摆系统,但无法准确获得对于神经连接的权重等一系列参数值 ;M. Ogino 的弹道步行方法,是通过观察人类行走方式得出的,只在摆动的起始和结束阶段才驱动非支撑腿。弹道行走也就是一个行走控制器,在运动过程中,非支撑腿在摆动中间时刻是由重力和惯性力共同作用的结果。该方法在建立高能行走双线性倒立摆系统方面有很好的应用。

[0004] 由于上述方法都是研究基于特定周期内稳定的双足运动,而在动态对抗和有限的空间内应用效率并不高,即无法在动态变化的外界环境下将行走的方向、速度和转角结合起来实时变化。上述问题是在仿人机器人的行走过程中应当予以考虑并解决的问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法解决现有技术中存在的基于特定周期内稳定的双足运动,而在动态对抗和有限的空间内应用效率并不高,即无法在动态变化的外界环境下将行走的方向、速度和转角结合起来实时变化的问题。

[0006] 本发明的技术解决方案是:

[0007] 一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法,包括足部落脚点规划、机器人躯干运动轨迹、足部空间轨迹规划、关节角度计算和反馈控制策略,

[0008] 步骤一,足部落脚点规划:采用蚁群算法进行路径规划得出机器人足部在二维空间下的落脚点,并计算出机器人的零力矩点 ZMP 值;

[0009] 步骤二,机器人躯干运动轨迹:由步骤一得出的 ZMP 值建立带预测控制的双线性倒立摆双线性倒立摆系统并得到机器人躯干的参考位姿;

[0010] 步骤三,足部空间轨迹规划:由步骤一的足部落脚点规划得出的落脚点使用三次样条插值法,得出每两个落脚点在三维空间中的最佳运行轨迹,即可获得足部参考位姿;

[0011] 步骤四,关节角度计算:由步骤二、步骤三得出躯干和足部的参考位姿利用逆运动学知识计算出机器人的膝盖处的关节角,踝关节的滚动角和俯仰角,股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角;

[0012] 步骤五,反馈控制策略:采用PID控制算法精确各个关节角度值并应用于实体机器人,由陀螺仪传感器信息值计算出机器人行走过程中的真实躯干位置,并与双线性倒立摆结合形成反馈控制,形成对整个行走过程的闭环控制。

[0013] 本发明一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法,采用蚁群算法进行路径规划得出机器人足部在二维空间下的落脚点并计算出机器人的零力矩点ZMP值;由ZMP的值建立带预测控制的双线性倒立摆双线性倒立摆系统(D-LIP)并得到机器人躯干的参考位姿;由足部落脚点规划得出的落脚点使用三次样条插值法,得出每两个落脚点在三维空间中的最佳运行轨迹,即可获得足部参考位姿;由上述两步得出躯干和足部的参考位姿利用逆运动学知识计算出机器人各个关节的角度;采用PID控制算法精确各个关节角度值并应用于实体机器人,由陀螺仪传感器信息值计算出机器人行走过程中的真实躯干位置,并与双线性倒立摆结合形成反馈控制,从而使整个双线性倒立摆系统闭环。进一步地,本发明在仿人机器人行走过程中,利用闭环控制实现机器人的全向行走。相比现有技术,本发明的机器人行走方法具有鲁棒性强、稳定性好的优点。

附图说明

[0014] 图1是本发明实施例的落脚点规划示意图;

[0015] 图2是本发明实施例的腿部的逆运动学计算示意图;

[0016] 图3是本发明实施例的闭环控制说明示意图;

具体实施方式

[0017] 下面结合附图详细说明本发明的优选实施例。

[0018] 如图1、图2和图3所示,本实施例提供一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法,包括足部落脚点规划、机器人躯干运动轨迹、足部空间轨迹规划、关节角度计算和反馈控制策略,

[0019] 步骤一,足部落脚点规划:采用蚁群算法进行路径规划得出机器人足部在二维空间下的落脚点,并计算出机器人的零力矩点ZMP值;具体包括以下步骤:

[0020] 步骤a,通过指定移动路径上的落脚点的方法来规划每一步,确定每步的步长 $s_x^{(n)}$ 、步宽 $s_y^{(n)}$ 和转向角度 $\theta^{(n)}$,如图1所示;

[0021] 在实际行走的过程中,机器人为了避免与其它物体发生碰撞,经常需要避障,为此,采用指定落脚点 $(p^{(0)}, p^{(1)}, p^{(2)}, \dots, p^{(n)}, \dots, p^{(N)})$ 的方法来规划每一步,其中N是由蚁群算法进行路径规划时确定的;将 $(s_x^{(n)}, s_y^{(n)}, \theta^{(n)})$ 称之为步行参数,第n个落脚点 $p^{(n)}$ 在X-Y

平面上可用 $(p_x^{(n)}, p_y^{(n)})$ 表示:

$$[0022] \quad \begin{pmatrix} p_x^{(n)} \\ p_y^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x^{(n-1)} \\ p_y^{(n-1)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_\theta^{(n)} & -s_\theta^{(n)} \\ s_\theta^{(n)} & c_\theta^{(n)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_x^{(n)} \\ -(-1)^n s_y^{(n)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

[0023] 式 (1) 中, $s_x^{(n)}$ 表示前进方向即 X 轴方向上的步长, $s_y^{(n)}$ 表示侧移方向即 Y 轴方向上的步宽, $\theta^{(n)}$ 表示踏足与 X 轴的夹角, 上标 (n) 均表示是第 n 步, $n = 0, 1, 2, \dots, N$; $c_\theta^{(n)} = \cos \theta^{(n)}$, $s_\theta^{(n)} = \sin \theta^{(n)}$, 是第 n 步的转向角 θ 的余弦和正弦值; $(p_x^{(0)}, p_y^{(0)})$ 为第一个支撑脚的位置, 式 (1) 中步行开始时是左脚, 如果开始步行的是右脚, 则将式 (1) 中 $-(-1)^n$ 改为 $(-1)^n$;

[0024] 步骤 b, 确定由当前位置到目标点移动过程中所有落脚点在 X-Y 平面上的位置;

[0025] 步骤 c, 相对于第 n-1 步而言第 n 步的位置, 可由第 n 步的步长 $s_x^{(n)}$ 、步宽 $s_y^{(n)}$ 和转向角度 $\theta^{(n)}$ 来确定, 并计算出第 n 步的终止速度;

[0026] 为了对步行速度进行限制, 首先需要理解步行单元的概念, 所谓步行单元为对于第 n-1 步到第 n 步的三维线性倒立摆双线性倒立摆系统; 机器人的质心 COM 的运动轨迹在 X-Y 平面上的投影是一段关于 y 轴对称的双曲线, 该双曲线在第一象限的 x 和 y 坐标值即是一个步行单元 $(\bar{x}^{(n)}, \bar{y}^{(n)})$:

$$[0027] \quad \begin{pmatrix} \bar{x}^{(n)} \\ \bar{y}^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\theta^{(n+1)} & -s_\theta^{(n+1)} \\ s_\theta^{(n+1)} & c_\theta^{(n+1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_x^{(n+1)}/2 \\ (-1)^n s_y^{(n+1)}/2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

[0028] 则第 n 步的步行单元的终止速度 $(\bar{v}_x^{(n)}, \bar{v}_y^{(n)})$ 可表示为:

$$[0029] \quad \begin{pmatrix} \bar{v}_x^{(n)} \\ \bar{v}_y^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\theta^{(n+1)} & -s_\theta^{(n+1)} \\ s_\theta^{(n+1)} & c_\theta^{(n+1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1+C)/(T_c S) \bar{x}^{(n)} \\ (1-C)/(T_c S) \bar{y}^{(n)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

[0030] 式 (3) 中 T_s 为每步的支撑时间, z_c 为机器人的质心 COM 在 z 轴上的高度, g 为重力常量, T_s 、 z_c 、 g 三者均为给定值; 记 $T_c = \sqrt{z_c/g}$, $C = \cosh(T_s/T_c)$, $S = \sinh(T_s/T_c)$ 。

[0031] 步骤二, 机器人躯干运动轨迹: 由步骤一得出的 ZMP 值建立带预测控制的双线性倒立摆双线性倒立摆系统并得到机器人躯干的参考位姿; 具体包括以下步骤:

[0032] 步骤 a, 利用步骤一得出的 ZMP 值建立带预测控制的双线性倒立摆系统, 利用采样时间 t 对质心 COM 和 ZMP 的轨迹进行三次多项式离散化, 并进行 N 次迭代计算;

[0033] 步骤 b, 让双线性倒立摆系统的输出尽可能准确地跟踪目标 ZMP 的参考轨迹, 考虑使跟踪性能指标极小化的问题, 假定机器人的躯干即是质心, 最后得出机器人质心 COM 的运动轨迹, 即得出机器人躯干的参考位姿 $\text{Trunk}_{\text{ref}}$ 。

[0034] 由步骤一足部落脚点规划得出的机器人的零力矩点 ZMP 的值为:

$$[0035] \quad x_{\text{ZMP}} = x_{\text{COM}} - (\ddot{x}_{\text{COM}} \times z_c) / g \quad (4)$$

[0036] 式 (4) 中, x_{COM} 和 z_c 分别表示机器人的质心 COM 沿 x 轴方向上的位移和在 z 轴上的高度, \ddot{x}_{COM} 为机器人的质心 COM 沿 x 轴方向上的加速度, x_{ZMP} 为 ZMP 在 x 轴方向上的值;

[0037] 将该双线性倒立摆系统分解为前进和侧移两个方向,即 X-Z 和 Y-Z 两个部分,则这两个部分是完全相同的,所以称为双线性倒立摆;

[0038] 在 X-Z 平面中,利用采样时间 t 对质心 COM 和 ZMP 的轨迹进行三次多项式离散化:

$$[0039] \quad \begin{cases} \mathbf{X}_{\text{COM}}(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & t & t^2/2 \\ 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{X}_{\text{COM}}(k) + \begin{pmatrix} t^3/6 \\ t^2/2 \\ t \end{pmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_{\text{COM}}(k) \\ \mathbf{x}_{\text{ZMP}}(k) = (1 \quad 0 \quad -z_c/g) \mathbf{X}_{\text{COM}}(k) \end{cases} \quad (5)$$

[0040] 式 (5) 中, $\mathbf{X}_{\text{COM}}(k) = (x_{\text{COM}}(kt) \quad \dot{x}_{\text{COM}}(kt) \quad \ddot{x}_{\text{COM}}(kt))^T$, 其中 $x_{\text{COM}}(kt)$ 、 $\dot{x}_{\text{COM}}(kt)$ 和 $\ddot{x}_{\text{COM}}(kt)$ 分别表示 kt 时刻机器人的质心 COM 沿 x 轴的位移量、速度和加速度;

$\ddot{\mathbf{x}}_{\text{COM}}(k) = \ddot{\mathbf{x}}_{\text{COM}}(kt)$ 表示机器人的质心 COM 沿 x 轴的加速度对时间的微分,作为双线性倒立摆系统在 kt 时刻的输入; $\mathbf{x}_{\text{ZMP}}(k) = x_{\text{ZMP}}(kt)$ 表示在 kt 时刻 ZMP 的 x 坐标值;

[0041] 此时需要使用预观控制的方法,利用 COM 轨迹预测出 ZMP 轨迹,同时又需要 ZMP 轨迹的 N 个样本点值来计算当前 COM 值;上述问题可以采用二次规划 QP 来解决,即为了让双线性倒立摆系统的输出 $x_{\text{ZMP}}(k)$ 尽可能准确地跟踪 ZMP 的参考轨迹值 $\mathbf{X}_{\text{ZMP}}^{\text{ref}}(k)$,考虑一个使跟踪性能指标极小化的问题,最后得出机器人质心 COM 的运动轨迹。

[0042] 注:假定 $\text{COM} = \text{Trunk}$,因为倒立摆双线性倒立摆系统是由一个点质量和一个可伸缩的无质量的腿构成,机器人的主要质量集中在躯干上,所以假定机器人的躯干即是质心。双线性倒立摆双线性倒立摆系统得出就是躯干的位姿 $\text{Trunk}_{\text{ref}}$ 。

[0043] 步骤三,足部空间轨迹规划:由步骤一的足部落脚点规划得出的落脚点使用三次样条插值法,得出每两个落脚点在三维空间中的最佳运行轨迹,即可获得足部参考位姿;

[0044] 步骤一中得出的是每个步行周期的足部位置,三维空间下足部运动的连续曲线需要根据 X-Y 平面上的离散点来确定。高次函数的计算量大,有剧烈振荡,数值稳定性差;而由于导数不连续,分段线性插值在分段点上仅连续而不光滑。但是样条函数可以同时解决这两个问题,使得插值函数既是低阶分段函数,又是光滑的函数。所以使用三次样条插值法来确定足部轨迹,也就是踝关节的轨迹,即能得到足部每个时刻运动位姿 Foot_{ref} 。

[0045] 步骤四,关节角度计算:由步骤二、步骤三得出躯干和足部的参考位姿 $\text{Trunk}_{\text{ref}}$ 和 Foot_{ref} ,利用逆运动学知识计算出机器人的膝盖处的关节角,踝关节的滚动角和俯仰角,股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角,如图 2 所示;

[0046] 由倒立摆双线性倒立摆系统和足部轨迹模块得出的躯干和足部的参考位姿 $\text{Trunk}_{\text{ref}}$ 和 Foot_{ref} ,可推出机器人自身的局部坐标系下理想的足部位置及其朝向,并用齐次变换矩阵来描述,记为 $\mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{Local}}$;接着表示相对于股关节滚动角 HipR 坐标系下的足部位置:

$$[0047] \quad \mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{HipR}} = \mathbf{M}_{\text{Foot}}^{\text{Local}} \times \mathbf{Rot}_x(\pi/4) \times \mathbf{Trans}_y(l_{\text{dist}}/2) \quad (6)$$

[0048] 式 (6) 中, l_{dist} 为两条腿之间的距离, $\mathbf{Rot}_A(B)$ 、 $\mathbf{Trans}_A(B)$ 分别表示 B 沿着 A 轴的旋转和平移;

[0049] 机器人的膝盖以及腿部肢体构成了一个三角形结构,其中的两边长为机器人的大

腿 A 和小腿 B 的长度,第三边的长度就是 M_{Foot}^{HipR} 的平移矢量 $\vec{r}(r_x, r_y, r_z)$ 的长度,即踝关节与股关节之间的距离 C:

$$[0050] \quad C = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad (7)$$

$$[0051] \quad \text{而又 } C^2 = A^2 + B^2 - 2 \times A \times B \times \cos \gamma \quad (8)$$

[0052] 式 (8) 中 γ 是大腿和小腿之间的夹角,所以膝盖处的关节角为:

$$[0053] \quad q_{Knee} = \pi - \gamma = \pi - \arccos\left(\frac{A^2 + B^2 - C^2}{2 \times A \times B}\right) \quad (9)$$

[0054] 踝关节的滚动角和俯仰角分别为:

$$[0055] \quad q_{AnkleR} = a \tan 2(r_y, r_z) \quad (10)$$

$$[0056] \quad q_{AnkleP} = a \tan 2\left(r_x, \sqrt{r_y^2 + r_z^2}\right) - \arccos\frac{B^2 + C^2 - A^2}{2 \times B \times C} \quad (11)$$

[0057] 再求取股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角,由于:

$$[0058] \quad \mathbf{M}_{HipR}^{Thigh} = \left(\mathbf{M}_{Thigh}^{Foot}\right)^{-1} \times \left(\mathbf{M}_{Foot}^{HipR}\right)^{-1} \quad (12)$$

$$[0059] \quad \mathbf{M}_{Thigh}^{Foot} = \mathbf{Rot}_x(q_{AnkleR}) \times \mathbf{Rot}_y(q_{AnkleP}) \times \mathbf{Trans}_z(B) \\ \times \mathbf{Rot}_y(q_{Knee}) \times \mathbf{Trans}_z(A) \quad (13)$$

[0060] 式 (12)、(13) 中, $\mathbf{M}_{Thigh}^{Foot}$ 是相对于足部而言其腿部位置的齐次变换矩阵, $\mathbf{M}_{HipR}^{Thigh}$ 是相对于腿部坐标系而言其股关节滚动角位置的齐次变换矩阵;

[0061] 然而由股关节的偏摆角 q_{HipY} 、滚动角 q_{HipR} 和俯仰角 q_{HipP} 可以推出:

$$[0062] \quad \mathbf{M}_{HipR}^{Thigh} = \mathbf{Rot}_z(q_{HipY}) \times \mathbf{Rot}_x(q_{HipR}) \times \mathbf{Rot}_y(q_{HipP}) \\ = \begin{pmatrix} c_y c_z - s_x s_y s_z & -c_x s_z & c_z s_y + c_y s_x s_z \\ c_y s_z + c_z s_x s_y & c_x c_z & s_y s_z - c_y c_z s_x \\ -c_x s_y & s_x & c_x c_y \end{pmatrix} \quad (14) \\ = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix}$$

[0063] 式 (14) 中, $c_x = \cos q_{HipR}$, $s_x = \sin q_{HipR}$ 表示股关节滚动角的余弦和正弦值;

[0064] $c_y = \cos q_{HipP}$, $s_y = \sin q_{HipP}$ 表示股关节俯仰角的余弦和正弦值;

[0065] $c_z = \cos q_{HipY}$, $s_z = \sin q_{HipY}$ 表示股关节偏摆角的余弦和正弦值;

[0066] 这样就可以计算出股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角分别:

$$[0067] \quad q_{HipY} = \text{atan2}(-R_{12}, R_{22}) \quad (15)$$

$$[0068] \quad q_{HipR} = \text{atan2}(R_{32}, -R_{12} s_z + R_{22} c_z) = \arcsin R_{32} \quad (16)$$

$$[0069] \quad q_{HipP} = \text{atan2}(-R_{31}, R_{33}) \quad (17)$$

[0070] 步骤五,反馈控制策略:采用 PID 控制算法精确各个关节角度值并应用于实体机

机器人,由陀螺仪传感器信息值计算出机器人行走过程中的真实躯干位置,并与双线性倒立摆结合形成反馈控制,形成对整个行走过程的闭环控制。

[0071] 步骤五中的反馈控制策略包括关节角控制和躯干控制,如图3所示,

[0072] 所述关节角控制为采用PID控制算法控制膝盖处的关节角,踝关节的滚动角和俯仰角,股关节的偏摆角、滚动角和俯仰角;利用逆运动学求解出的各关节角度值向机器人传送时,总会出现较大的振荡和延迟,并不能按照计算出来的值准确执行。基于上述原因,可以采用PID控制算法精确腿部各个关节角度。

[0073] 所述躯干控制中,由机器人各个部位传感器的值计算出其躯干位置,在实际执行过程中考虑50%的传感器 $Trunk_{gyr}$ 的信息,在动态行走双线性倒立摆系统中,闭环控制需要考虑机器人躯干位置的误差 $Trunk_{error}$;由于机器人的腿关节存在机械反冲力,而对关节角的PID控制又无法消除该反冲力,这就给躯干误差值的准确计算带来了一定难度;在行走过程中,机器人的膝盖总是弯曲的,只要膝关节在其反冲力范围内就不会产生振荡,所以认为躯干位置的误差值就是由该机械反冲力造成的;躯干的误差值记为参考值与实际值之间的差 $Trunk_{error} = Trunk_{ref} - Trunk_{gyr}$,用以修正倒立摆双线性倒立摆系统原本的输出值 $Trunk_{ref}$,从而形成整个行走过程的闭环控制。

[0074] 本实施例一种基于闭环控制的仿人机器人全向行走方法,采用蚁群算法进行路径规划得出机器人足部在二维空间下的落脚点并计算出机器人的零力矩点ZMP值;由ZMP的值建立带预测控制的双线性倒立摆双线性倒立摆系统(D-LIP)并得到机器人躯干的参考位姿;由足部落脚点规划得出的落脚点使用三次样条插值法,得出每两个落脚点在三维空间中的最佳运行轨迹,即可获得足部参考位姿;由上述两步得出躯干和足部的参考位姿利用逆运动学知识计算出机器人各个关节的角度;采用PID控制算法精确各个关节角度值并应用于实体机器人,由陀螺仪传感器信息值计算出机器人行走过程中的真实躯干位置,并与双线性倒立摆结合形成反馈控制,从而使整个双线性倒立摆系统闭环。进一步地,本实施例在仿人机器人行走过程中,利用闭环控制实现机器人的全向行走。相比现有技术,本实施例的机器人行走方法具有鲁棒性强、稳定性好的优点。最高可以达到前进15厘米/秒,后退10厘米/秒,侧移9厘米/秒,转身35度/秒。即使外界有一定程度干扰的情况下,也可以连续稳定地行走30米而不摔倒。

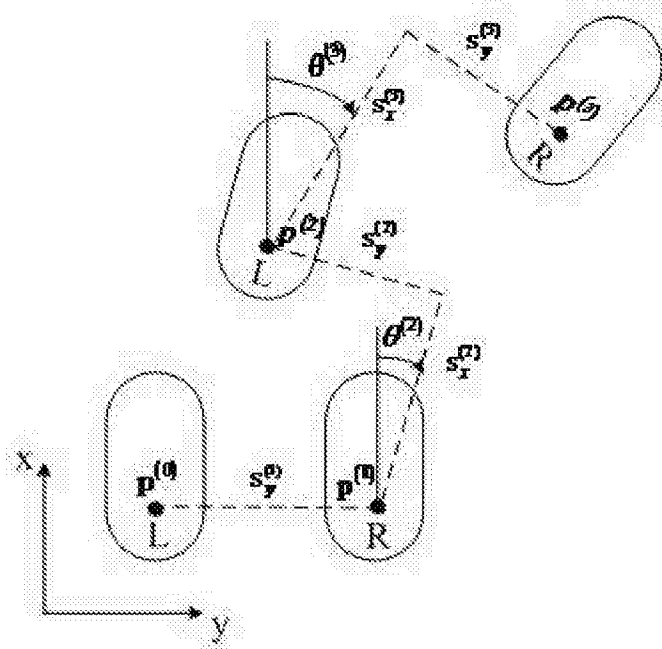


图 1

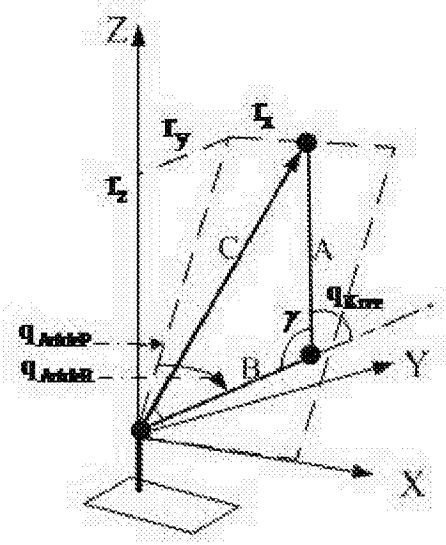


图 2

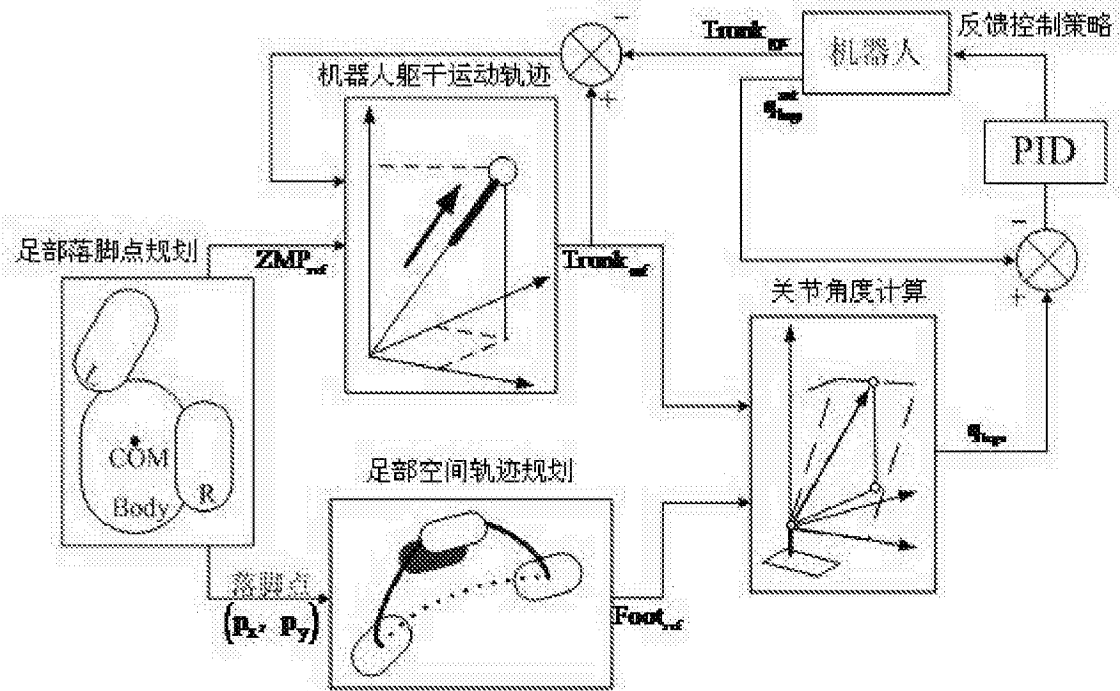


图 3