

• 人工智能 •

仿人机器人两步步态规划算法研究

陈杜勇, 肖南峰

(华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 为了进一步提高仿人机器人步行时的稳定性, 通过对人类步行的研究, 并从两足步行机的两步步态规划方法中得到启发, 对仿人机器人步行也进行类似的两步规划, 但由于结构上的不同, 仿人机器人中采用加入上肢运动补偿的方式实现平衡。规划仿人机器人的运动姿态, 然后根据零力矩点必须落在稳定区域的原则, 对仿人机器人的上肢运动轨迹进行求解, 通过这种加入上肢补偿的两步规划来实现仿人机器人的稳定步行。从实验结果可以看出, 采用这种两足步态规划方法, 在仿人机器人两足步行时, 可以使机器人上肢与下肢协调运动, 从而提高了步行的稳定性。

关键词: 步态规划; 两步规划; 零力矩点; 仿人机器人

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7024 (2010) 09-1985-04

Research on humanoid robot two-step gait planning algorithm

CHEN Du-yong, XIAO Nan-feng

(School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to improve stability of walking of humanoid robot, inspired by research on the human walking and two-step gait planning of two-legged walking machine, the similar method is used for humanoid robot, but with upper limb compensation for their different structure. When a humanoid robot walks, firstly plan the posture movement of the humanoid robot, and then plan the upper limb movement based on the rule that zero moment point must be in the stability area. That is humanoid robot two-step gait planning through upper limb movement compensation. The experimental result shows that this gait planning method can make the humanoid robot walk more steadily through cooperation of the upper limbs and lower limbs like human and it also improves stability of its walking.

Key words: gait planning; two-step gait planning; zero moment point; humanoid robot

0 引 言

仿人机器人由于其具有人类的外形, 可以利用双足在复杂的地形环境中移动, 可以代替人类完成一些人类不愿意做或者危险性很大的工作而受到当今机器人科研工作者的青睐, 吸引了越来越多的人参与到仿人机器人的研究工作当中来。仿人机器人之所以有比其它类型机器人具有更多的优点, 是因为它采用两足步行。因此, 仿人机器人的步行一直是研究的重点, 其中步态规划在步行过程中是重要的一环。

近十年, 随着各种高新技术的迅速发展, 这一领域的研究取得了长足的进步, 仿人机器人已经能基本实现两足步行, 但是离我们理想中的要求还相去甚远。机器人步行的稳定性和速度依然无法满足机器人对人类生活服务时的需要。为了提高仿人机器人步行稳定性, 通过对人类步行和两足步行机构的步行进行深入研究, 找出一种有效提高机器人步行稳定性的步态规划算法, 并使机器人的步行更类似人类的步行, 是由上下肢一起协调来完成。

1 两足步行机构和两步规划法

所谓步态是在步行过程中, 仿人机器人各个关节在时序和空间上的一种协调关系, 通常由各关节的运动轨迹来描述^[1]。步态规划就是找出一序列的步态使仿人机器人能稳定和快速的步行。要实现这个目的有赖于仿人机器人各个部件之间相互协调的运动。

两步规划是为两足步行机构提出的步态规划方法, 现在已被广泛的运用于步行机构。由于两足步行机构有平衡块, 所以使用两步规划相对简单。然而, 仿人机器人没有像步行机构一样的平衡块, 因此, 无法直接使用两步步态规划。但仿人机器人拥有像人类一样的上肢, 并可以灵活的运动。通过对人类步行的研究, 人类步行是上身与下肢两者协调来实现平衡的。于是, 在仿人机器人的两步规划中, 把对平衡块运动的规划改成对仿人机器人上肢运动的规划可以实现步行的平衡。从而, 使仿人机器人的步行是上肢与下肢相协调的运动, 更类似人类的步行, 同时也具有更好的稳定性。

完整的步态规划包括姿态规划和ZMP(零力矩点)轨迹规

收稿日期: 2009-06-12; 修订日期: 2009-08-16。

基金项目: 国家自然科学基金与中国民用航空总局联合基金项目 (60776816); 广东省自然科学基金重点项目 (8251064101000005)。

作者简介: 陈杜勇 (1984 -), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 研究方向为仿人机器人; 肖南峰 (1962 -), 男, 江西南昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为仿人机器人。E-mail: cdj0754@qq.com

划等两方面的内容。姿态是指仿人机器人在步行运动过程中,某一时刻各组件相对于参考坐标系的空间位置,可由步行运动过程中某一时刻各关节的广义坐标表示^[2]。ZMP 是指重力与惯性力合力的延长线与支撑面的点,是目前步态规划中应用最广泛的稳定判据。当仿人机器人的 ZMP 落在其支撑多边形内就实现了动态平衡^[3]。

ZMP 的计算公式如下

$$X_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i X_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i'' + g_z) X_i - \sum_{i=1}^n m_i (X_i'' + g_x) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i'' + g_z)} \quad (1)$$

$$Y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i Y_i}{\sum_{i=1}^n f_i} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i'' + g_z) Y_i - \sum_{i=1}^n m_i (Y_i'' + g_y) Z_i}{\sum_{i=1}^n m_i (Z_i'' + g_z)} \quad (2)$$

式中: X_i 、 Y_i 、 Z_i ——机器人第 i 个部件在空间坐标系中的三维坐标 m_i 、 g 分别是第 i 个部件的质量以及重力加速度。上面的两式中都包含有 Z_i'' (Z_i 的两次导数)。由于两足步行机构在行走的过程中 Z_i 是恒定不变的。这与步行机构的结构有关,步行机构只有下肢和平衡块。图 1(a) 为双足步行机 IWR(韩国 Inha 大学研制的双足步行机),图 1(b) 为仿人机器人仿真模型。

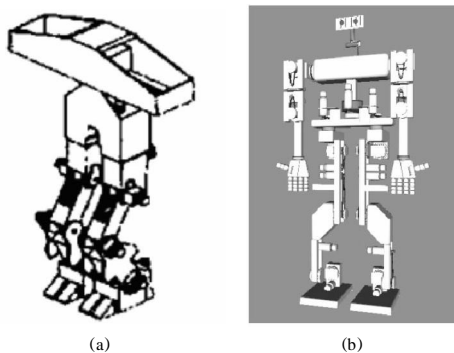


图 1 步行机 IWR 及仿人机器人仿真模型

通过对比图 1(a) 和图 1(b),两者在结构上存在着很大的差异。步行机构没有躯干和上肢,平衡块可沿 X、Y 两个方向移动以及绕 Z 轴转动,从而可以通过调节平衡块在两个水平方向上的移动规律,控制仿人机器人所受两个水平方向惯性力的大小和方向,进而得到期望的 ZMP 轨迹。并且由于步行机构平衡块 Z 坐标不变的特性,使重 ZMP 的计算变得非常方便。而仿人机器人有上肢与躯干。躯干只能绕 Z 轴转动,并且上肢的运动会使上身上的 Z 坐标发生变化。这些物理结构上的差异使得两步步态规划无法在仿人机器人上直接使用。

两步规划是一种在步行机构上运用的最为普遍的步态规划方法。两步规划法^[4]是把步态规划分为两个步骤。第一步是规划下肢的行走姿态;第二步是根据已规划的下肢行走姿态及期望的 ZMP 轨迹来确定平衡块的运动规律。这样就能较精确地规划 ZMP 的轨迹。

通过两步规划的步骤可以看出,两步规划是一种比较简单方便的步态规划方法,但是它只适用于两足步行机构。由

于它需要平衡块的帮忙,而无法直接用于仿人机器人的步态规划。本文对两步规划进行改进,把对平衡块运动的规划改成为仿人机器人上肢运动的规划,实现两步规划在仿人机器人上的运用。

2 通过上肢补偿的两步规划

在对人类步行进行大量的研究后发现,人类之所以能获得非常稳定的步行,是由于人类步行是由下肢与上肢共同协调来完成的。很多研究也表明,如果采用仿人机器人上肢运动进行补偿,即使在出现较大干扰时,仍然可以有效阻止仿人机器人摔倒,从而使仿人机器人可以在后续的运动过程中,逐渐调整步态,逐渐恢复到参考轨迹上来。从而提高仿人机器人步行稳定性。

这种通过上肢补偿的两步规划法就采用从下到上的规划方式。主要包括以下两个步骤:第一步规划仿人机器人下肢的行走姿态;第二步根据已规划的下肢行走姿态及期望的 ZMP 轨迹来确定仿人机器人上肢的补偿运动。

2.1 下肢的行走姿态规划

姿态规划的主要目标是使仿人机器人在步行过程中做到平滑运动。如,采用正弦曲线规划仿人机器人重心轨迹,可以避免仿人机器人重心在两个脚掌支撑面内转换所引起的冲击,同时也使关节的转动角度改变得更加平滑。规定摆动脚在 Z 轴方向上的运动轨迹为正弦曲线,可以减小摆动脚着地时引起的冲击,这样在脚与地面接触的瞬间,其速度为 0。

本文采用目前被普遍采用的姿态规划方法来产生仿人机器人已知的关节运动轨迹。它包含以下几方面内容:

- (1) 仿人机器人采用平行步态^[5],双脚轨迹始终保持平行;
- (2) 行走过程中,髋关节距离地面高度保持不变^[6],这样能有效降低计算难度;
- (3) 仿人机器人重心在地面投影为正弦曲线;
- (4) 仿人机器人躯干始终保持与地面垂直^[7];
- (5) 摆动脚 Z 轴方向的运动轨迹为正弦曲线,从而使脚着地时刻速度为零;
- (6) 脚掌始终保此与地面平行。

2.2 基于 ZMP 的上肢补偿运动规划

不同于两足步行机构,仿人机器人没有平衡块,它不能通过规划平衡块的运动,使其 ZMP 满足稳定要求。为此,本文采用仿人机器人上肢的运动来补偿,使得仿人机器人与人类步行的更相似,由上肢与下肢共同协调来完成步行,从而具有更好的稳定性。

图 2 为一般仿人机器人的质点模型。这里作以下规定:

- (1) 仿人机器人为由质点构成的系统,即每一个关节匀质连杆视为质点,质心和重心重合;
- (2) 行走地面是刚性的,且不为其它外力移动;
- (3) 设参考坐标系 O-XYZ,其中 Z 轴竖直向上, X 轴沿仿人机器人前进的方向, Y 轴通过右手法则确定;
- (4) X 轴、Y 轴和 Z 轴方向上,转动摩擦为 0。

二足步行的动力学基本模型为^[8]

$$\tau = H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + G(q) \quad (3)$$

式中: H ——惯量矩阵 h ——所有能够影响二足步行运动状

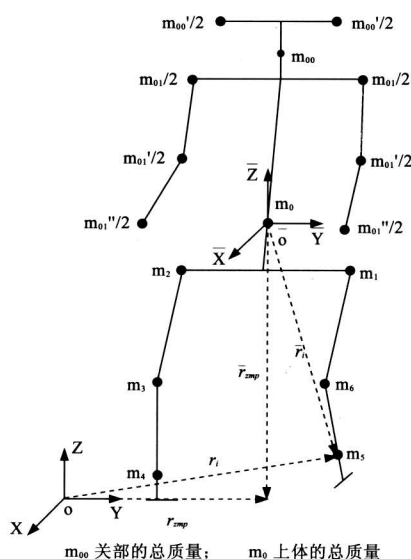


图2 以质点表示的仿人机器人模型

态(速度,加速度等)的力(包括摩擦力、地面反作用力、克里奥利力、离心力等)的作用; \mathbf{G} 就表示仿人机器人重力的作用。

根据仿人机器人质点模型(图2)及二足步行动力学基本模型(式(3)),得到式(4)的动力学模型

$$m_{01} \ddot{\mathbf{r}}_{01} + \sum_{i=0}^n m_i (\ddot{\mathbf{r}}_i - \ddot{\mathbf{r}}_{zmp}) (\ddot{\mathbf{r}}_i + \mathbf{g}) + \mathbf{T} = 0 \quad (4)$$

式中: m_0 ——上肢躯干的总质量; \mathbf{T} ——作用在仿人机器人上(即ZMP上)的外力矩之和。

$$\mathbf{T} = \mathbf{G} \cdot (\mathbf{r}_G - \mathbf{r}_{zmp}) + \mathbf{F} \cdot (\mathbf{r}_F - \mathbf{r}_{zmp}) + \mathbf{R} \cdot (\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{zmp}) \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (6)$$

由于 \mathbf{T} 作用于ZMP,它可以表示为: $\mathbf{T} = (0, 0, T_z)$ 。而 $\mathbf{r}_{zmp} = (x_{zmp}, y_{zmp}, 0)$ 。

考虑到各个关节之间的相对运动,引入了一个固联在腰部的随仿人机器人一起运动的参考坐标系 $\bar{O}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$; $\bar{O}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ 的原点在参考坐标系中的坐标是 (x_q, y_q, z_q) 。

通过把躯干的运动视为未知,移到方程左边;在下肢和ZMP轨迹预先规划的基础上,式(4)式可以写成分量形式如下

$$m_{01}(\ddot{z}_{01} - \ddot{z}_{01}) + m_0(\ddot{z}_0 + \ddot{z}_q)(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_q + \mathbf{g}_x) - m_0(\ddot{z}_0 + \ddot{z}_q + \mathbf{g}_z)(\ddot{x}_0 - \ddot{x}_{zmp}) = -M_x(t) \quad (7)$$

$$m_{01}(\ddot{y}_{01} - \ddot{y}_{01}) - m_0(\ddot{z}_0 + \ddot{z}_q)(\ddot{y}_0 + \ddot{y}_q + \mathbf{g}_y) + m_0(\ddot{z}_0 + \ddot{z}_q + \mathbf{g}_z)(\ddot{y}_0 - \ddot{y}_{zmp}) = -M_y(t) \quad (8)$$

$$m_{01}(\ddot{x}_{01} - \ddot{x}_{01}) - m_0(\ddot{y}_0 - \ddot{y}_{zmp})(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_q + \mathbf{g}_x) + m_0(\ddot{y}_0 + \ddot{y}_q + \mathbf{g}_z)(\ddot{x}_0 - \ddot{x}_{zmp}) = -M_z(t) \quad (9)$$

$$\text{式中, } (-M) = - \left(\sum_{j=0}^n m_j (\ddot{\mathbf{r}}_j - \ddot{\mathbf{r}}_{zmp}) (\ddot{\mathbf{r}}_j + \mathbf{g}) + \mathbf{T} \right) = \begin{bmatrix} -M_x(t) \\ -M_y(t) \\ -M_z(t) \end{bmatrix}.$$

上肢的运动应该可以通过式(7)、式(8)和式(9)生成,但是这些方程变量是相关的,耦合度很高,属二阶非线性方程。因此,直接从它们得到解析解是不太可能的。此类问题的解法有很多种^[9-10]。基本思想就是通过进一步简化二足步行模型,进而实现求解方程解耦,然后通过迭代的方法求出最终解。

解式(7)、式(8)和式(9),首先根据实际运动,通过一些假设将非线性方程线性化。这里,作如下两个假设:①仿人机器人

的肩只做上-下运动;②躯干没有垂直方向上的运动。这样就会得到

$$\ddot{z}_0 + \ddot{z}_q = c \quad (10)$$

式中: c ——常数; $\ddot{x}_x = \ddot{x}_y = 0$; $\ddot{x}_z = \ddot{x}_q$ 。从而,式(7)、式(8)和式(9)得以简化

$$m_0 c (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_q) - m_0 (\ddot{x}_0 - \ddot{x}_{zmp}) \mathbf{g} = -M_x(t) \quad (11)$$

$$-m_0 c (\ddot{y}_0 + \ddot{y}_q) + m_0 (\ddot{y}_0 - \ddot{y}_{zmp}) \mathbf{g} = -M_y(t) \quad (12)$$

$$m_{01} R^2 \ddot{\theta} = -M_z(t) - M_z(t) \quad (13)$$

$$M_z(t) = -m_0 (\ddot{x}_0 + \ddot{x}_q) (\ddot{y}_0 - \ddot{y}_{zmp}) + m_0 (\ddot{y}_0 + \ddot{y}_q) (\ddot{x}_0 - \ddot{x}_{zmp}) \quad (14)$$

式中: θ ——肩在水平面内的转动角速度。

为了获得躯干运动的近似解 $\{\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \theta\}$,首先通过傅里叶变换和傅里叶逆变换从式(11)和式(12)计算出 $\{\ddot{x}_0, \ddot{y}_0\}$ 。然后代入到式(14)就可以得到 $M_z(t)$,解式(13)就可以求得 θ 了。

解式(13)得到的 θ 解是近似解,通过一种迭代算法^[8],设定一个误差范围,反复把近似解代入式(7)、式(8)和式(9),当误差落在可接受的程度时,就认为得到了精确的上肢躯干运动轨迹。

假设 $\varepsilon(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ 为可接受的程度,则

$$E_n = E_{n-1} + \frac{e_{n-1}}{2} \quad (15)$$

为坐标轴上力矩积累误差极值的估算公式。

经过 n 次迭代后, $E_n(E_{mx}(n), E_{my}(n), E_{mz}(n))$ 表示 n 次积累下来的力矩误差。 e_n 表示计算出来的力矩误差。当 $E_{mx}(n) < \varepsilon_{mx}$, $E_{my}(n) < \varepsilon_{my}$, $E_{mz}(n) < \varepsilon_{mz}$ 时,说明已经找到满足要求的解,停步迭代,如图3所示。

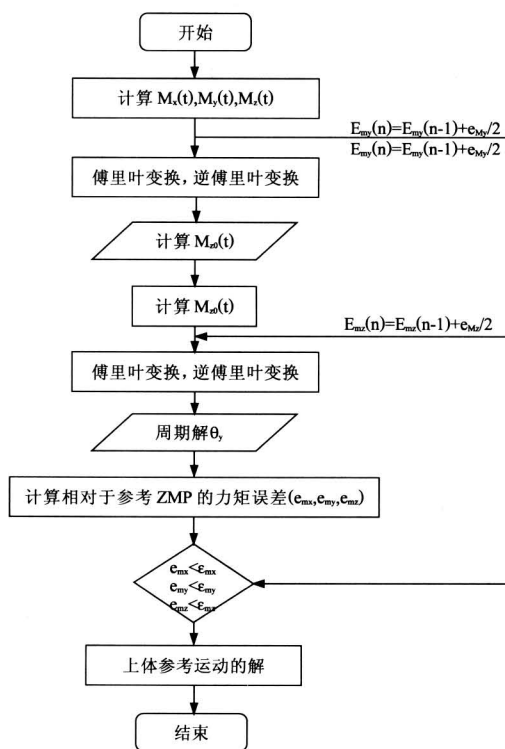


图3 求解上肢运动的程序流程

3 实验结果

在棒状模型仿真环境下,通过对平面仿人机器人模型进行步行试验。

首先根据设定的仿人机器人姿态规划,可以生成仿人机器人在步行时几个主要关节的轨迹(如图4)。图4从上到下分别为臂关节、髋关节和脚关节的运动轨迹。

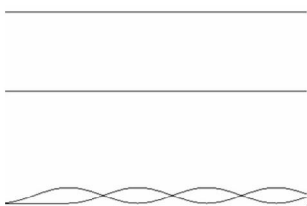


图4 仿人机器人主要关节的运动轨迹

试验数据发生在连续的一个步行周期之内。棒状模型可以清晰地看到仿人机器人二足步行的轨迹(如图5)。

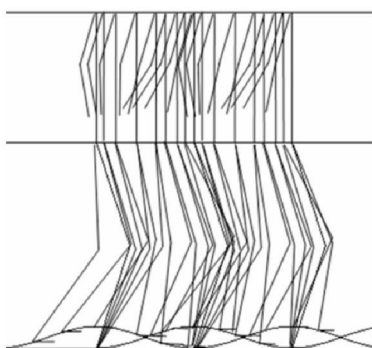


图5 仿人机器人步行仿真

从实验的结果看,通过上肢补偿的仿人机器人步态规划方法可以实现稳定的二足步行,并且步行比较平滑,过度比较均匀。

稳定裕度是仿人机器人两足步行稳定程度的一种量化描述,其量化参数是ZMP与稳定区域边界的最短距离,用 u_{zmp} 表示

$$u_{zmp} = \min(D_1, D_2, D_3, D_4) \quad (16)$$

式中 D_1, D_2, D_3, D_4 ——ZMP点到脚的四条边的距离(如图6)。

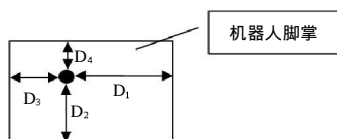


图6 机器人稳定裕度

在机器人步行周期里,随机的采样7个点,对加入上肢补偿和未加入上肢补偿的稳定裕度进行比较。如图7所示,由上而下分别为加入补偿后和加入补偿前的曲线。从图中可以看出由于加入了机器人的上肢运动补偿,稳定性有了明显的提高。

4 结束语

本文通过对人类步行的研究和从两足步行机的两步步态

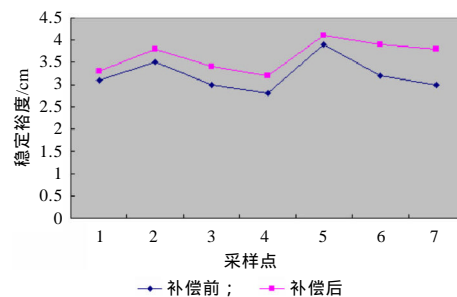


图7 稳定裕度比较

算法的研究,提出了通过上肢补偿的两步规划方法对仿人机器人的步态进行规划,并给出了一个具体的求解过程,最后通过实验验证了它的可行性。并对加入上肢补偿的前后仿人机器人的稳定性进较,发现机器人的稳定性有了一定的提高,与实验的预想基本一致。

虽然通过这种步态规划方法使仿人机器人有的步行更类似人类的步行,也具有更高的稳定性,但却存在计算量大等问题,使机器的步行速度大受限制。因而,要把此方法真正应用的实际机器人的应用中,需要进一步改进完善,主要是改进求解的方式,提高计算速度,使它有更好的运用到仿人机器人步行中。

参考文献:

- [1] 刘涛,王志良.基于遗传算法的双足步行机器人步行姿态控制策略[J].微计算机信息,2006,22(7-2):252-254.
- [2] 董玮,王如彬.节律性步态运动中CPG对肌肉的控制模式的仿真研究[J].动力学与控制学报,2008,6(4):327-331.
- [3] 肖乐,殷晨波.仿人机器人上下楼梯稳定行走控制策略[J].计算机工程与设计,2009,30(10):2453-2456.
- [4] 张博,杜志江.双足步行机器人步态规划方法研究[J].机械与电子,2008(4):52-55.
- [5] 彭朝琴,付永领.基于不稳定度的仿人型机器人步态规划方法[J].北京航空航天大学学报,2007(33):949-953.
- [6] 张伟,杜继宏.双足步行机器人的步态规划[J].计算机工程与应用,2002,38(13):214-216.
- [7] 赛瑞军,马培荪.基于ZMP点的两足机器人步态优化[J].机械科学与技术,2003,22(1):77-79.
- [8] Vukobratovic M, Borovac B, Potkonjak V. Towards a unified understanding of basic notions and terms in humanoid robotics [J].Robotica,2007,25:87-101.
- [9] Yamaguchi J,Takanishi A,Kato I.Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion [C].Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,1993:561-566.
- [10] 彭秀艳,丁虎,屈阳.基于HMCD的仿人机器人步态规划[J].系统仿真学报,2008,24(20):6834-6838.