

基于旋转势场法的双足机器人避障路径规划方法

宋 晖^{1,2},殷国富^{1*},李光日³

(1. 四川大学 制造科学与工程学院,四川 成都 610065;2. 西南科技大学 计算机学院,四川 绵阳 621000;
3. 中国空间技术研究院,北京 100094)

摘 要:针对双足机器人在实际环境中运动时难以实时规避障碍物的问题,提出一种基于旋转势场法的避障路径规划方法。该方法将足迹规划思想引入基于势场法的局部实时路径规划中,通过设计新的障碍物旋转势场来解决传统势场法的局部极小值问题,进而利用旋转势场和足迹规划间的映射关系实现双足机器人的实时避障运动。将该算法应用到1台双足机器人上进行实验验证,现场设定障碍物使路径更接近实际作业环境,机器人顺利完成了U型场地的避障,验证了该方法的有效性。

关键词:双足机器人;旋转势场;避障;路径规划

中图分类号:TP242.6

文献标志码:A

Path Planning Method Based on Rotary Potential Field for a Biped Robot

SONG Hui^{1,2}, YIN Guofu^{1*}, LI Guangri³

(1. School of Manufacturing Sci. and Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. School of Computer Sci. and Technol., Southwest Univ. of Sci. and Technol., Mianyang 621000, China;

3. China Academy of Space Technol., Beijing 100094, China)

Abstract: Since the biped robots are difficult to avoid obstacles in real time due to the balance constraints when the biped robots walk in actual environments, a path planning and obstacle avoidance method was proposed based on the rotating potential field. First, the idea of footprint planning was introduced into the local real-time path planning based on the potential field. Then, the local minima problem in the traditional potential field was solved by designing a new obstacle rotation potential field and the real-time obstacle avoidance was achieved using the mapping relationship. Finally, the effectiveness of the proposed method was confirmed by obstacle avoidance experiments on a small size biped robot in the environment with U-shaped obstacles.

Key words: biped robot; rotating potential field; obstacle avoidance; path planning

目前双足机器人相关研究主要集中在避障、稳定行走、动态操作、人机交互等方面。双足机器人的应用环境往往是非结构化的,存在着动态变化的障碍物。因此,在实际环境中实现避障成为双足机器人路径规划研究的重点问题之一,在这方面已有很多研究成果。

与全局规划相比,势场法应用在路径规划中具有计算量小,实时性好,规划路径高效、平滑、安全等优点。但传统势场法也存在明显的不足,即势场力容易

出现局部极小值问题。Yousef等^[1]使用遗传算法,通过优化应用到机器人上的作用力改进旋转势场使机器人轨迹更光滑。Jia等^[2]通过修改旋转势场的吸引力和反作用力函数来改善性能。Yin等^[3]通过机器人和目标之间的相对的位置、速度、加速度重新定义旋转势场的吸引力和斥力函数。与以上方法类似,Shi等^[4]改进了吸引力势场函数和斥力函数。

Motoi等^[5]提出了基于控制扩展轨道能量的机器人避障方法。Lee等^[6]使用全景环境地图的图像

收稿日期:2014-12-25

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2013ZX04005-012);四川省科技支撑计划资助项目(2012GC0008)

作者简介:宋 晖(1974—),男,博士生,副教授。研究方向:智能机器人技术。E-mail:songh717@163.com

*通信联系人 E-mail:gfyin@scu.edu.cn

探测器和描述符来处理存在视野之外的障碍。Budiharto 等^[7]在室内环境使用双足机器人立体视觉提出一个多动障碍物回避策略。还有一些学者利用传感器来设计避障策略。例如, Tsai 等^[8]使用超声波传感器和电子罗盘传感器来进行试验。Brooks 等^[9]在机器人的2个肩膀上装上1对超声波传感器来测量距离。Li 等^[10]提出了基于4个超声波传感器的行为学习并为机器人提出行为策略实现避障行为。

作者提出了一种新的势场方法——旋转势场方法,来解决传统势场法的容易导致局部极小值的问题。然后,将足迹规划思想引入势场法,提出基于旋转势场法的双足机器人避障路径规划方法,实现了双足机器人的实时避障运动。

1 障碍物旋转势场

1.1 旋转势场

传统势场法中障碍物斥力场的作用是将处在其中的机器人推离障碍物,虽然这种斥力可以避免机器人与障碍物之间的碰撞,却不利于机器人的避障运动。机器人在运动过程中为了实现无碰撞到达目标点,不仅需要机器人远离障碍物,还需要机器人能够平滑且安全的绕过障碍物。为此,提出一种新的障碍物势场——旋转势场来代替传统的斥力场作用于机器人的运动空间中。

旋转势场可以描述为,运动空间中的障碍物以其几何中心为轴进行匀速转动,在 $X - Y$ 运动平面上的一定范围内形成旋转势场,进入旋转势场中的机器人相对于旋转障碍物作匀速运动,其相对运动方向沿旋转势场半径方向远离障碍物。根据匀速转动参考系下对运动物体的研究可知,在旋转坐标系下,机器人实现的是传统势场法中远离障碍物的运动,而在世界坐标下,机器人在旋转势场的作用下可以实现平滑且安全的绕行运动。

由于旋转势场属于匀速转动参考系下的非惯性系统,因此对于机器人在旋转势场中所受到的旋转力可以根据科里奥利力的定义如式(1)进行设计:

$$\mathbf{F}_{\text{rot}} = -2k_{\text{rot}} \mathbf{v}_{\text{rot}} \times \boldsymbol{\omega} \quad (1)$$

其中: \mathbf{F}_{rot} 为旋转势场中机器人所受到的虚拟旋转力; k_{rot} 为旋转常系数; $\boldsymbol{\omega}$ 为障碍物匀速旋转的角速度; \mathbf{v}_{rot} 为机器人相对于旋转障碍物匀速运动的相对速度,方向沿旋转半径向外; \times 为矢量积,表示 \mathbf{F}_{rot} 的方向垂直于 \mathbf{v}_{rot} 和 $\boldsymbol{\omega}$ 所确定的平面,与右手定则确定的方向相反。 \mathbf{F}_{rot} 的大小可由式(2)确定:

$$|\mathbf{F}_{\text{rot}}| = 2k_{\text{rot}} |\mathbf{v}_{\text{rot}}| |\boldsymbol{\omega}| \quad (2)$$

$$|\boldsymbol{\omega}| = \begin{cases} k_m \frac{\rho_c - \rho_d}{\rho_c}, & \rho_d < \rho < \rho_c; \\ k_m \frac{\rho_c - \rho_{\text{obs}}}{\rho_c}, & \rho_{\text{obs}} < \rho < \rho_d; \\ 0, & \rho > \rho_c \end{cases} \quad (3)$$

其中, k_m 为相对速度常系数, ρ_c 为障碍物可控旋转势场的半径距离, ρ_d 为障碍物危险旋转势场的半径距离, ρ_{obs} 为障碍物的旋转半径距离, ρ 为机器人到障碍物几何中心的距离。

1.2 旋转障碍物

具有旋转势场的障碍物称之为旋转障碍物,在旋转势场中,目标点仍具有传统的引力场,而运动空间中的所有障碍物则具有新的旋转势场。通常情况下,运动空间中障碍物的大小、形状往往不尽相同。为了使不同的障碍物实现统一的旋转势场,将大小、形状各不相同的复杂障碍物简化为由若干个大小、形状相同的单元组成。作者称这种大小、形状相同的单元为旋转单元,它的大小可以根据实际情况设定,运动平面内的投影为正方形,具有统一的旋转势场,如图1所示。

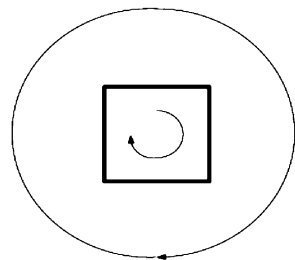


图1 旋转单元及其旋转势场

Fig.1 Rotating units and its potential field

而由这些旋转单元所组成的复杂障碍物的旋转势场也是由这些旋转单元的旋转势场连接形成的,如图2所示。

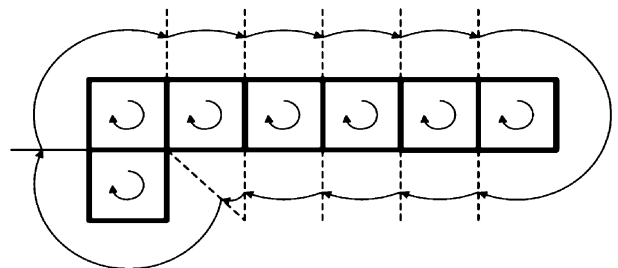


图2 旋转单元组成旋转障碍物

Fig.2 Rotating obstacle and its potential field

1.3 旋转方向

机器人在旋转势场中受到旋转力的作用绕开障碍物运动。由前述旋转势场和旋转力的定义可知,

机器人的运动方向取决于障碍物的旋转方向。因此,如何确定障碍物旋转势场的旋转方向是旋转势场法中一个很重要的环节。通过障碍物相对机器人和目标连线的位置来确定组成障碍物的旋转单元的旋转方向。当机器人和目标连线通过障碍物时,根据连线的位置确定障碍物的分割线,分割线两侧的障碍物旋转单元设置不同的旋转方向,分别指向目标点;当多个障碍物分别位于机器人和目标连线两侧时,连线两侧的障碍物设置不同的旋转方向,分别指向目标点。

在提出足迹规划模型和旋转势场法之后,将二者的思想有机的结合起来,通过作者提出的旋转势场法来实现实时足迹规划。

2 实时避障路径规划

双足机器人的避障规划可以描述为:双足机器人在获得足够的任务和环境信息的基础上,根据任务要求寻找一条从起始点到目标点的最优或者次优的无碰撞路径。

2.1 足迹规划

双足机器人稳定步行阶段(除起步和停止阶段)是左右腿状态交替变化的循环阶段,并且左右腿运动轨迹是相互对称的,因而可以将稳定步行分解为一个循环出现的基本步态单元,进行分析和规划。这一基本单元可以描述为3个足迹的集合,分别为支撑腿支撑足迹 F_s 、摆动腿离开足迹 F_{off} 和落地足迹 F_{on} ,作者称之为足迹规划单元。

在运动规划空间中,足迹参数表示为:

$$F = [x \ y \ \theta \ Info]^T \quad (4)$$

其中, (x, y, θ) 分别为机器人足迹的位置和方向角,离散变量 $Info \in \{L, R\}$ 表征足迹属于左足或右足。

在一个连续的稳定步行阶段中,一个足迹规划单元相当于双足机器人在运动方向上的一步。在一个足迹规划单元中,摆动腿的离开足迹和支撑足迹可以由前一个连续的足迹规划单元确定,因此,只需要对该足迹规划单元中的落地足迹和质心运动进行规划。为了规划落地足迹的位置和方向,用步长、步宽和方向角来定义和描述步行参数,如图3所示。在支撑足上建立局部坐标系,坐标轴方向与世界坐标系 O 相同, $L_s^{(n)}$ 为前后方向上的步长, $W_i^{(n)}$ 为左右方向上的步宽, $\theta^{(n)}$ 为落地足迹的方向角。则第 n 步落地足迹 $F_{on}^{(n)}$ 的落脚点 P_n 位置可以用下式表示:

$$\begin{bmatrix} x^{(n)} \\ y^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(n-1)} \\ y^{(n-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin \theta^{(n)} & \cos \theta^{(n)} \\ \cos \theta^{(n)} & -\sin \theta^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s^{(n)} \\ -(-1)^n W_1^{(n)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $W_1^{(n)}$ 的系数 $-(-1)^n$ 表示双足机器人在起步时的支撑足为右脚,如果起步时的支撑足是左脚,那么应该用系数 $(-1)^n$ 取代 $-(-1)^n$ 。利用足迹规划单元可以很容易地生成双足步行轨迹,只需要将一系列足迹规划单元组合起来即可实现任意方向的行走模式。

2.2 基于障碍物旋转势场的避障足迹规划

为了实现基于旋转势场法的双足机器人足迹规划,需要确定旋转势场和足迹规划间的映射关系。在足迹规划中,可以通过步行参数来确定落地足迹的位置和方向;而在势场法中,机器人在势场中的运动趋势是由势场力的大小和方向确定。为此,建立如下的映射关系:

1) 双足机器人足迹规划单元中落地足迹的方向角由虚拟受力点 $P_n' = [x_n', y_n']^T$ 在势场中所受势场力的方向确定,如图3~5所示。

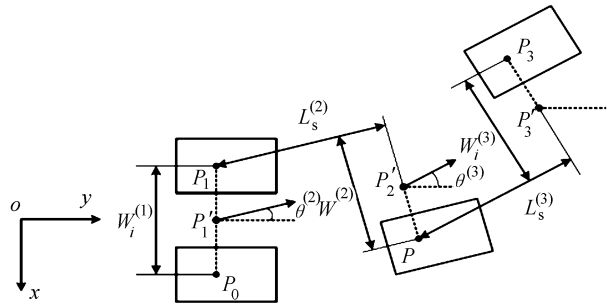


图3 步行参数

Fig. 3 Step parameters

设在世界坐标系下,目标点记作 $T = [x_{tar}, y_{tar}]^T$,障碍物 $i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的几何中心记作 $O_i = [x_{obs}^i, y_{obs}^i]^T$,引力方向角记作 θ_{tar} ,斥力方向角记作 θ_{obs}^i ,则

①引力方向角

$$\theta_{tar} = \arctan\left(\frac{y_{tar} - y_n'}{x_{tar} - x_n'}\right) \quad (6)$$

②旋转斥力方向角

$$\theta_r^i = \arctan\left(\frac{y_{obs}^i - y_n'}{x_{obs}^i - x_n'}\right) \quad (7)$$

式中, $\theta_r^i \in [0, 180^\circ]$ 。

当旋转障碍物逆时针旋转时:

$$\theta_{obs}^i = \theta_r^i - 90^\circ \quad (8)$$

当旋转障碍物顺时针旋转时:

$$\theta_{\text{obs}}^i = \begin{cases} \theta_r^i + 90^\circ, & x_{\text{obs}}^i > x', y_{\text{obs}}^i > y'; \\ -(\theta_r^i + 90^\circ), & x_{\text{obs}}^i < x', y_{\text{obs}}^i < y' \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\theta_{\text{obs}}^i \in [-180^\circ, +180^\circ]$, 顺时针为正, 逆时针为负。

当双足机器人在运动空间中受到 N 个旋转势场的作用时, 双足机器人落地足迹方向角由 N 个旋转斥力的合斥力方向角确定:

$$\theta_{\text{obs}} = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sin \theta_{\text{obs}}^i |F_{\text{rot}}^i|}{\sum_{i=1}^N \cos \theta_{\text{obs}}^i |F_{\text{rot}}^i|} \right) \quad (10)$$

其中, θ_{obs}^i 为双足机器人受到旋转合斥力方向角。

2) 双足机器人足迹规划单元中落地足迹的位置参数由步长、步宽等步行参数确定。

通过以上映射关系, 即可将足迹规划的思想引入到基于人工势场法的实时避障规划方法中。本文提出的基于旋转势场法的双足机器人足迹规划算法, 其形式化描述如下:

步骤1: 确定第 n 步足迹规划单元中支撑足参数 $F_s^{(n)}$, 其中, 支撑足迹位置参数 $P_s^{(n)} = [x_s^{(n)}, y_s^{(n)}]$, 方向角参数 $\theta_s^{(n)}$ 以及 $\text{Info}_s^{(n)}$ 参数可以由第 $n-1$ 步足落地足迹参数确定:

$$P_s^{(n)} = P_{\text{on}}^{(n-1)} \quad (11)$$

$$\theta_s^{(n)} = \theta_{\text{on}}^{(n-1)} \quad (12)$$

$$\text{Info}_s^{(n)} = \text{Info}_s^{(n-1)\text{sym}} \quad (13)$$

步骤2: 确定第 n 步虚拟受力点 P_n' 的位置, 虚拟受力点 $P_n' = [x_n', y_n']^T$ 可以由支撑足参数确定:

$$\begin{bmatrix} x_n' \\ y_n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s^{(n)} \\ y_s^{(n)} \end{bmatrix} + (-1)^n \frac{1}{2} W_l^{(n-1)} \begin{bmatrix} \cos \theta^{(n-1)} \\ \sin \theta^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, W_l 的系数 $(-1)^n$ 表示双足机器人在起步时的

支撑足为右脚, 如果起步时的支撑足是左脚, 那么应该用系数 $-(-1)^n$ 取代 $(-1)^n$ 。

步骤3: 分别计算第 n 步虚拟受力点处所受到势场力的大小。并根据足迹规划与势场法的映射关系式分别确定引力场和旋转势场中双足机器人足迹规划的步行参数。

步骤4: 根据式(14) 分别确定双足机器人第 n 步落地足迹位置及质心运动参数, 从而确定第 n 步足迹规划单元。

步骤5: 由第 n 步的足迹规划单元可以生成一系列关节运动轨迹, 根据双足机器人运动约束模型判断这一系列关节运动轨迹是否满足关节角约束、肢体碰撞约束和运动学约束等约束。如果不满足约束, 则进行运动调节; 如果满足约束, 则重复步骤1至步骤5, 直到双足机器人完成避障运动。

3 实验

为验证提出的双足机器人避障路径规划方法, 设计了如图4所示的双足机器人平台。机器人的具体参数如表1所示。

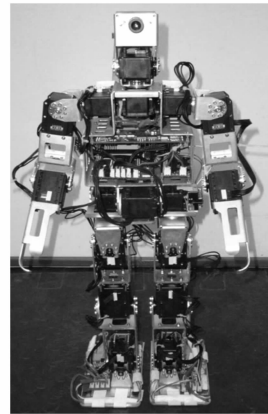


图4 双足机器人平台

Fig.4 Test bed of piped robot

表1 双足机器人详细参数

Tab.1 Specifications of biped robot

身高/cm	体重/kg	自由度	控制器	传感器	电源	驱动器	摄像头	通信
55	3.8	21	ARM9, S3C2440A ×3 400 MHz	陀螺仪, 加速度计, 自制压力 传感器, 线性度 0.2% FS	Li - Po7.4V ×2, 2 100 Amh, 20C/40C	数字伺服驱动器 RX - 28 × 18	CMOS 摄像头	无线通信 模块

双足机器人运动控制器采用主频达到 400 MHz 的 32 位微处理器 S3C2440 作为核心处理器, 其运算速度和丰富的外设接口能够满足在线步行规划、多传感器数据采集处理及稳定控制等功能, 运动控制器原理框图如图5所示。

图6、7分别展示了U型障碍物环境下以及多

个障碍物环境下的双足机器人避障运动结构。图中方块代表障碍物, U型障碍物由各障碍物单元组成; 点虚线圆圈表示障碍物危险区域, 而虚线圆圈则表示障碍物可控区域; 矩形为双足机器人步行足迹; *号表示足迹规划中的虚拟受力点 p_n' ; 三角形则表示运动的目标点。

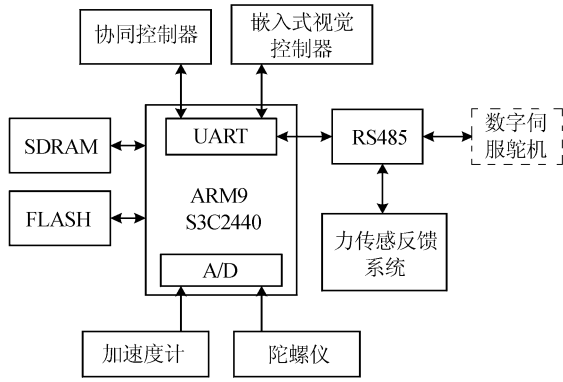


图5 运动控制器原理框图

Fig.5 Block diagram of the motion controller

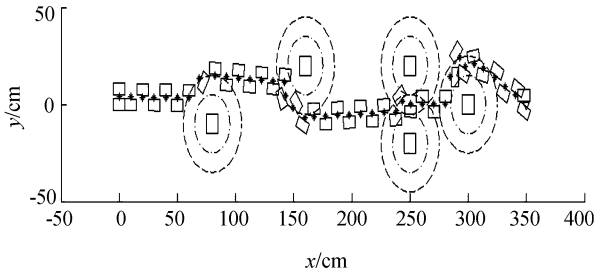


图6 多个障碍物环境下的避障运动

Fig.6 Obstacle avoidance for multiple obstacles

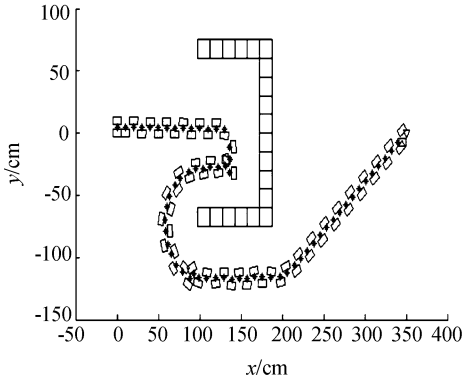


图7 U形障碍物环境下双足机器人的避障

Fig.7 Obstacle avoidance for U-shape obstacle

图6中双足机器人需要通过2个障碍物之间才能到达目标,这是典型的局部极小值情况。而从实验结果可以看出,双足机器人能够在多个障碍物存在的运动空间内通过旋转势场的作用顺利到达目标点。图7给出了双足机器人如何利用旋转势场实现在U型障碍物下的避障运动。

4 结论

针对双足机器人避障问题,在双足机器人足迹规划模型的基础上,提出了一种基于障碍物旋转势场的双足机器人避障足迹规划方法。该方法通过设计一种障碍物旋转势场来解决传统势场法的局部极小值问题,在建立足迹规划模型与势场法映射关系的基础

上,将足迹规划思想引入基于势场法的局部实时路径规划中,实现了双足机器人的实时避障运动。

参考文献:

- [1] Yousef M T, Hosam E I A, Habashy S M, et al. Improved potential field controller for obstacle avoidance in mobile robots [C]//29th National Radio Science Conference. Cairo:IEEE,2012:495-502.
- [2] Jia Qian, Wang Xingsong. An improved potential field method for path planning[C]//Control and Decision Conference. Shenyang:IEEE,2010:2265-2272.
- [3] Yin Lu, Yin Yixin. An improved potential field method for mobile robot path planning in dynamic environments[C]//Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang:IEEE,2008:4847-4852.
- [4] Shi Pu, Zhao Yiwen. An efficient path planning algorithm for mobile robot using improved potential field[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guilin:IEEE,2009:1704-1708.
- [5] Motoi Naoki, Ohnishi Kouhei. Collision Avoidance Method of Humanoid Robot Based on Controlling Extended Orbital Energy[C]//IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference. Paris:IEEE,2006:3963-3968.
- [6] Lee Doyoung, Lu Yanfeng, Kang T K, et al. 3D vision based local obstacle avoidance method for humanoid robot [C]//12th International Conference on Control, Automation and Systems. Jeju Island:IEEE,2012:473-475.
- [7] Widodo B, Ro'fah N R. Multiple moving obstacles avoidance for humanoid service robot using stereo vision and bayesian approach[C]//2012 6th Asia Modelling Symposium. Bali:IEEE,2012:1-6.
- [8] Tsai Chenghsuan, Huang Pohsuan, Chou Weichung, et al. Sonar-based obstacle avoidance using a path correction method for autonomous control of a biped robot for the Learning Stratification and Performance[C]//2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Xiamen:IEEE,2010:532-536.
- [9] Brooks G, Krishnamurthy P, Khorrani F. Humanoid robot navigation and obstacle avoidance in unknown environments[C]//2013 9th Asian Control Conference (ASCC), Istanbul:IEEE,2013:1-6.
- [10] Li Yaju, Chuo Weichung, Chen Chenyuan, et al. The development on obstacle avoidance design for a humanoid robot based on four ultrasonic sensors for the learning behavior and performance [C]//2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Macao:IEEE,2010:376-379.