

基于动态系统的多障碍实时规避算法



王伟光¹ 尹健² 钱祥利¹ 周子航³

1 山东管理学院智能工程学院 济南 250357

2 河南理工大学土木工程学院 河南 焦作 454003

3 湖北工业大学电气与电子工程学院 武汉 430068

摘要 机器人自主操控的应用日益广泛,工作区域动态干扰的风险也随之增加。针对机器人在工作空间中存在的障碍实时规避问题,提出了一种基于动态系统的多目标实时规避算法。首先构造动力系统调制模型,其次设置调制矩阵,然后构建障碍规避路径,最后提出多障碍动态规避模型。该算法不再以障碍物的事前分析作为先决条件,而是根据当前场景中的障碍物直接计算出调制矩阵,采用动力系统调制方法实现了障碍物的不可穿透性表述,且不改变动力系统的平衡点。在仿真实验中,针对空间依附障碍规避问题,用连续调制算法(CM)与所提算法进行对比仿真,验证了所提算法的有效性。最后进行多类障碍环境仿真,结果表明该算法能够有效解决静态多障碍以及动态多障碍的实时规避路径规划问题。

关键词: 空间机器人;实时规避;多障碍;路径规划;动力系统

中图分类号 TP391

Realtime Multi-obstacle Avoidance Algorithm Based on Dynamic System

WANG Wei-guang¹, YIN Jian², QIAN Xiang-li¹ and ZHOU Zi-hang³

1 School of Intelligent Engineering, Shandong Management University, Jinan 250357, China

2 School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China

3 School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract With the increasing application of autonomous robot control, the risk of dynamic interference in the working area also increases. Aiming at the problem of real-time obstacle avoidance of robots in the workspace, this paper proposes a realtime multi-target avoidance algorithm based on dynamic system. Firstly, the modulation model of the dynamic system is constructed, then the modulation matrix is set up, then the obstacle avoidance path is constructed, and finally the multi-obstacle dynamic avoidance model is proposed. This algorithm no longer takes the prior analysis of obstacles as a prerequisite, but directly calculates the modulation matrix according to the obstacles in the current scene, and uses the dynamic system modulation method to realize the impenetrability representation of obstacles without changing the equilibrium point of the dynamic system. In the simulation experiment, aiming at the problem of avoiding spatial attachment obstacles, the continuous modulation algorithm(CM) is used to compare and simulate with the proposed algorithm, and the effectiveness of the algorithm is verified. Finally, the simulation results show that the algorithm can effectively solve the problem of static multi-obstacle and dynamic multi-obstacle avoidance path planning.

Keywords Space robot, Realtime obstacle avoidance, Multi-obstacles, Path planning, Dynamical system

1 引言

机器人行为仿真作为计算机技术科学研究的重要内容,在众多方面得到了有效应用^[1-4]。当人与机器人紧密合作时,需要机器人快速适应各种情况,以适应外部干扰并最终确保操作者的安全。快速适应意味着机器人必须对外部干扰实时作出反应。常见的外部干扰有:目标位置的改变、未知障碍的

存在及其与人或其他物体的意外接触。

实时响应外部扰动的一种可行方案是将规避行为表示为一个动力系统(Dynamical System),该系统对扰动具有较强的鲁棒性,保障了算法的收敛性^[5-6]。为了对未知的障碍物作出反应,机器人必须快速调整其运动路径以避免碰撞。

规避路径的生成方法可分为两类:一类是全局规划方法,另一类则是实时反应生成方法。全局规划方法是一种复杂的

本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(11705103);山东省重点研发计划项目(2019GGX105013);山东管理学院科研启航计划(QH2020Z08)

This work was supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(11705103), Key R&D Project of Shandong Province(2019GGX105013) and "Sailing" Program of Shandong Management University Scientific Research (QH2020Z08).

通信作者:王伟光(wwgxl@163.com)

全局算法,即使在非常复杂的情况下,多自由度机器人也能找到最短的无碰撞路径。尽管可以通过算法并行化处理以缩短计算时间^[7],但这种方法的运算耗时仍然过长,难以满足在线应用需求。

后者是一种实时更新机器人路径的局部规划方法。其中最广为使用的是一种基于人工势场的规划方法^[8-9]。人工势场法的基本思想是对目标产生引力势场,对障碍物产生斥力势场,从而规避途中的障碍,顺利到达目标位^[10]。文献^[11]基于人工势场法,结合碰撞预测提出了一种无碰撞航路规划方法,能够有效地避免无谓避碰行为,且无局部极小值和航路点震荡问题。文献^[12]基于人工势场提出了一种机器人路径规划方法,通过对路径进行平滑优化,在时间和长度上均对路径进行了进一步优化,因此能够很好地使机器人顺利避开障碍物并最终到达目标点。文献^[13]基于人工势场与蚁群算法提出了一种多飞行器冲突解脱方法,以避免碰撞的风险,从而保障空域运行安全。为了提高机械臂在动态避障时的安全性和精确性,文献^[14]提出了一种基于速度场的人工势场避碰算法,从而实现了机械臂的动态目标的追踪、移动障碍物避碰和安全性评估。人工势场法也存在明显的缺点,如目标不可达、死锁和局部极小值等问题。文献^[15]将路径规划算法的优点与动态反应技术性相结合,提出了一种能够跳过局部极小值的解决方案。该方法利用路径规划算法离线计算初始弹性带,得到无碰撞路径。然而,当被执行的路径因存在障碍而变得不可行时,该方法则不能在线重新规划^[16]。在研究过程中,有研究者尝试通过构建特殊微分系统来避免局部极小值的出现。例如,文献^[17-18]将附加项应用于离散动态路径规划(DMP),形成行动路径并避开空间障碍。文献^[19]提出了一种广义一阶动力系统的调制技术,给出了障碍物表面的解析表示,计算了使原系统局部变形的调制矩阵。该方法中的调制技术是一种有效的方法,能够将安全问题与运动生成技术的鲁棒性结合起来,保持了调制系统的收敛特性。然而,障碍物表面采取解析描述的方式,将降低方法在未知情况以及动态环境中运用的有效性。

本文提出了基于动态系统的多目标实时规避算法。该算法不再以障碍物的事前分析作为先决条件,而是以当前位置与障碍物之间的欧氏距离进行分析,能够根据当前状态直接计算调制矩阵,因此比其他需要障碍物表面分析的方法更简便。最后通过仿真和算法对比验证了所提算法的有效性。

2 动力系统调制模型

动力系统调制模型是基于一阶动力系统(Dynamical System)产生的路径假设。该系统可以是稳定的(定常的),也可以是非稳定的(时变的)。对于 $\xi \in R^n$ 系统,可将稳定与非稳定表示为:

$$\dot{\xi} = f(\xi) \quad (1)$$

$$\dot{\xi} = f(t, \xi) \quad (2)$$

其中, $f(\cdot)$ 连续函数,而 $\dot{\xi}$ 是 ξ 的第一次导数。

为了简化符号,下文中省略了变量对时间的依赖性,使用了表示稳定系统和非稳定系统的变量。当已知起始点为 ξ_0 ,通过 ϕ 积分可求出所需路径:

$$\xi_{i+1} = \xi_i + \phi \delta t, i=0,1,\dots \quad (3)$$

其中, δt 是积分时间步长。当积分时间步长足够小时,采用逆向欧拉积分法将是合理的。

通过一个合适的矩阵 $M(\xi)$ 对该动力系统进行调制:

$$\dot{\xi} = M(\xi) \phi \quad (4)$$

这样可以在避开障碍物的同时保持动力系统的稳定性。

3 调制矩阵

假设场景中只有一个空间障碍物,其表面可以用轨迹描述为 $\Phi(\tilde{\xi}):R^n \rightarrow R^{20}$ 。例如以 $\Phi(\tilde{\xi}) = \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} - r^2 = 0$ 表示以 ξ 中心, r 为半径的空间球面体。假设 Φ 函数是连续可微的,其法向量可表示为:

$$n(\tilde{\xi}) = \left[\frac{\partial \Phi}{\partial \tilde{\xi}_1}, \frac{\partial \Phi}{\partial \tilde{\xi}_2}, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial \tilde{\xi}_n} \right]^T \quad (5)$$

此外,假设 Φ 随着 $\|\tilde{\xi}\|$ 单调递增。用 Φ 在点 ξ 的价值衡量机器人与障碍物表面的距离。此外,定义当 $\tilde{\xi}$ 在障碍物内部时 $\Phi(\tilde{\xi}) < 0$, \tilde{p} 在障碍物表面时 $\Phi(\tilde{\xi}) = 0$, $\tilde{\xi}$ 在障碍物外部 $\Phi(\tilde{\xi}) > 0$ 。

使用法向量可为障碍物上的每一点上定义一个切向超平面。将其推广至任意形状的空间障碍物,其空间的超平面的点可定义为 $\Phi(\tilde{\xi}) \geq 0$ 。其切向超平面可表示为:

$$v_j^i(\tilde{\xi}) = \begin{cases} \frac{\partial \Phi(\tilde{\xi})}{\partial \tilde{\xi}_{i+1}}, & j=1 \\ \frac{\partial \Phi(\tilde{\xi})}{\partial \tilde{\xi}_{i+1}}, & j=i+1, i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n \\ 0, & j \neq 1, j \neq i+1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, v_j^i 是对应于第 i 个基向量的第 j 个分量,每个 $v_j^i(\tilde{\xi})$ 分量可以直接由 $n(\tilde{\xi})$ 分量计算获得。

矩阵 $V(\tilde{\xi}) = [n(\tilde{\xi}) \ v_1(\tilde{\xi}) \ \dots \ v_{n-1}(\tilde{\xi})]$ 是空间的标准正交基。空间障碍物的法向量 $n(\tilde{\xi})$ 以及相应的切超平面如图1所示,其中蓝色区域表示障碍内部($\Phi(\tilde{\xi}) < 0$),白色区域表示障碍物外部($\Phi(\tilde{\xi}) > 0$)。

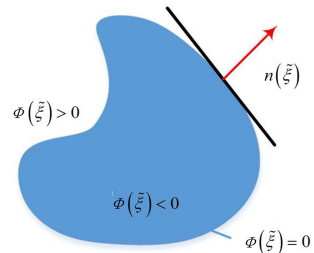


图1 障碍物的法向量以及切超平面

Fig. 1 Normal vector of the obstacle and the tangent hyperplane

定义对角矩阵 $E(\tilde{\xi})$ 为:

$$E(\tilde{\xi}) = \begin{bmatrix} \lambda_1(\tilde{\xi}) & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n(\tilde{\xi}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} \lambda_1(\tilde{\xi}) = 1 - \frac{1}{|\Phi(\tilde{\xi})+1|} \\ \lambda_i(\tilde{\xi}) = 1 - \frac{1}{|\Phi(\tilde{\xi})+1|}, \quad i=2,3,\dots,n \end{cases} \quad (8)$$

对于空间障碍,令集合 $P_g \in R^n, g=1,2,\dots,G$ 表示障碍表面的点。于是, $\Phi(\tilde{\xi})$ 可用障碍表面各点的欧氏距离进行描述:

$$D(\tilde{\xi}) = \min(\sum_{i=1}^n (P_{1,i} - \tilde{\xi}_i)^2, \dots, \sum_{i=1}^n (P_{G,i} - \tilde{\xi}_i)^2) \quad (9)$$

$$\Phi(\tilde{\xi}) = \sqrt{D(\tilde{\xi})} \quad (10)$$

其中, $P_{g,i}$ 为第 g 个点的第 i 个分量; $\tilde{\xi}_i$ 为动力系统当前状态的第 i 个分量。

4 障碍规避路径

前文的动态调制矩阵 $M(\xi)$ 可用于机器人路径规划,使其不会与障碍物相撞。在此基础上构建规避障碍物的路径模型,并在避障过程中考虑用户的偏好。

首先,构建安全区域模型。其所需的安全度可根据动态调制矩阵 $M(\tilde{\xi})$, 获得:

$$M(\tilde{\xi}) = V(\tilde{\xi})E(\tilde{\xi})V(\tilde{\xi})^{-1} \quad (11)$$

利用矩阵式(11)对式(4)进行调制,可以证明从障碍物外开始的轨迹 $\tilde{\xi}(t)$ 永远不能穿过凸面障碍物,即: $\Phi(\tilde{\xi}(0)) \geq 0 \rightarrow \Phi(\tilde{\xi}(t)) \geq 0, \forall t > 0$ 。

调制基本上由动力系统的局部变形组成,从而产生无碰撞路径。调制效应在障碍物边界处最大,在远离障碍物的点则消失。事实上 $\Phi(\tilde{\xi})$ 随着 $\|\tilde{\xi}\|$ 单调增加,矩阵将收敛于单位矩阵并随着与表面的距离的增加而增加。

通过改变动态调制矩阵的特征值,可以调整障碍物产生的调制幅度:

$$\begin{cases} \lambda_1(\tilde{\xi}) = 1 - \frac{1}{|\Phi(\tilde{\xi})|^{\frac{1}{\rho}}} \\ \lambda_i(\tilde{\xi}) = 1 - \frac{1}{|\Phi(\tilde{\xi})|^{\frac{1}{\rho}}}, \quad i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\rho > 0$ 是反应性参数。反应性参数越大,则偏转幅度越大,因此机器人对障碍物的反应就越早。

图2举例说明了在均匀流中使用不同的反应性参数对障碍物规避的影响。随着反应性参数的增加,反应性随之增加,因此气流偏转的时间越早,偏转的幅度则越大。

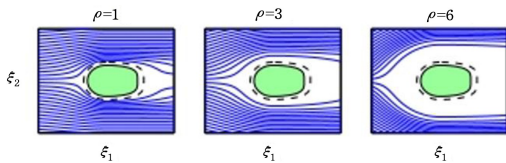


图2 不同的反应性参数在均匀流中的影响

Fig. 2 Effects of different reactivity parameters on homogeneous flow

如图3(a)所示,在对障碍物的规避过程中,由于障碍物的调制继续影响运动,对路径会产生尾部效应。当应对感应不确定时,这样的行为将是有益的,将减少不精确检测障碍的真实体积。但当不需要考虑感应不确定性问题时,可以通过定

义动态调制矩阵的第一特征值来消除尾部效应。

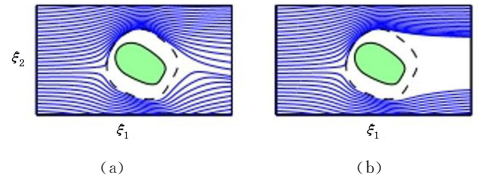


图3 规避路径的尾部效应示意图

Fig. 3 Schematic of the tail effect of circumvention path

$$\lambda_i(\tilde{\xi}) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{|\Phi(\tilde{\xi})|^{\frac{1}{\rho}}}, & n(\tilde{\xi})^T \dot{\tilde{\xi}} < 0 \\ 1, & n(\tilde{\xi})^T \dot{\tilde{\xi}} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)可使用 $n(\tilde{\xi})^T \dot{\tilde{\xi}}$ 检测路径是朝向还是远离障碍物。由式(13)可得图3(b)所示的结果。从图中可以看出,尾部效应大大降低了。但是为了保证速度的连续性,通过障碍物后的路径仍然需要稍作调整。

5 多障碍规避模型

依据前文可实现对单一障碍的规避。然而当空间中存在多个障碍物时,现有的动态调制矩阵是难以满足要求的,需要对其进行修正,以包含对所有障碍物的影响。针对空间多障碍问题,其动态调制矩阵不能简单地通过将所有障碍物的动态调制矩阵相乘得到。因为这只能保证其中一个障碍物的不可穿透性条件。因此,同时考虑关联参考点 $\xi^{0,k}$ 的障碍物及其边界函数 $\Phi^k(\xi, \xi^{0,k}), k=1,2,\dots,K$ 。对式(8)进行修改,根据第 k 个障碍物当前状态和其他障碍物状态计算的特征值由式(14)获得:

$$\begin{cases} \lambda_1^k(\tilde{\xi}^k) = 1 - \frac{\omega^k(\tilde{\xi}^k)}{|\Phi^k(\tilde{\xi}^k)|} \\ \lambda_i^k(\tilde{\xi}^k) = 1 - \frac{\omega^k(\tilde{\xi}^k)}{|\Phi^k(\tilde{\xi}^k)|}, \quad i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\tilde{\xi}^k = \xi - \xi^{0,k}$; $\Phi^k(\tilde{\xi}^k)$ 是 $\Phi(\xi; \xi^{0,k})$ 的简要表示; $\omega^k(\tilde{\xi}^k)$ 是加权系数,其可根据下式计算获得:

$$\omega^k(\tilde{\xi}^k) = \prod_{i=1, i \neq k}^K \frac{(\Phi(\tilde{\xi}^i) - 1)}{(\Phi(\tilde{\xi}^k) - 1) + (\Phi(\tilde{\xi}^i) - 1)} \quad (15)$$

$\omega^k(\tilde{\xi}^k)$ 是 0 和 1 之间的连续积极标量,即 $0 \leq \omega^k(\tilde{\xi}^k) \leq 1$ 。此外,在第 k 个障碍物的边界处 $\Phi(\tilde{\xi}^k) = 1$ 时,加权系数满足 $\omega^k(\tilde{\xi}^k) = 1, \omega^i(\tilde{\xi}^i) = 0 (\forall i \in 1,2,\dots,K \text{ and } i \neq k)$ 。

将式(15)代入式(7)给出的特征值矩阵中,可将每个障碍物的动态调制矩阵表示为:

$$M(\tilde{\xi}^k) = E(\tilde{\xi}^k)D(\tilde{\xi}^k)(E(\tilde{\xi}^k))^{-1} \quad (16)$$

在此基础上,构建考虑所有障碍物影响的组合调制矩阵,并确保 k 个障碍物的不可穿透性:

$$\bar{M}(\xi) = \prod_{k=1}^K M(\tilde{\xi}^k) \quad (17)$$

6 仿真实验

我们在 1.6 GHz 和 1.8 GHz 双核 CPU、8GRAM 计算硬件上,运用 PyCharm IDE 工具实现了本文算法。该仿真架构由两个独立的 ROS 节点组成,并允许每个节点在具有不同调

度优先级的单独线程中执行。这样,机器人的控制节点将不受其他操作的影响。

在这个仿真实验中,对比了 Continuous Modulation(CM)算法^[19,21]和本文提出的算法。在仿真场景中有一个由两个附着椭球体组成的三维遮挡区域。原路径由模型 $\dot{p}(t)=K(g-p(t))$, $K=10$ 积分计算。

如图 4 所示,本文算法能够获得至终点的自由路径,而 CM 算法所得路径却在局部最小值处停止。在 CM 算法中,是将障碍物建模为两个椭球。因为这两个椭球障碍物是相连的,所以两个物体之间的距离可能同时为零,所以导致 CM 算法不能直接处理凹形咬合。为了避免 CM 算法所存在的这一问题,需要计算凸包的解析表示,但这将导致大量可达自由面积的损失,不利于实际运用。相反,本文所提算法不需要障碍物的解析表示。在每次迭代中,它只需要找到最近的点,然后用这个点来计算调制矩阵。这样就找到了一条通往目标终点平坦且可行的路径。

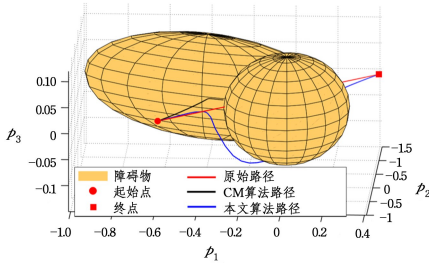


图 4 算法对比效果图

Fig. 4 Algorithm comparison renderings

运用本文算法,对单个障碍规避情形进行了仿真。其中选择了两种不同方向进入所得的规避路径,分别如图 5 和图 6 所示。图中以黑色五角星为目标终点,褐色椭圆区域为空间障碍物,黑色虚线为机器人的主要驶入方向。图 5 为针对水平方向驶入的规避路径,图 6 为斜上方驶入的规避路径。

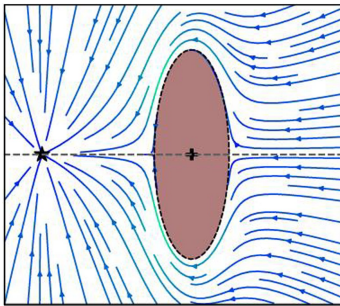


图 5 水平方向进入单一障碍规避仿真图

Fig. 5 Horizontal entry single obstacle avoidance simulation diagram

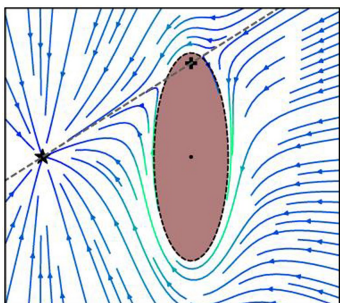


图 6 斜向进入单一障碍规避仿真图

Fig. 6 Oblique entry single obstacle avoidance simulation diagram

考虑机器人从初始位置到达目标终点面临多个障碍物的情形。在仿真实验中,机器人必须避开终点附近环形分布的 12 个褐色障碍物,以到达黑色五角星位置。图 7 为由不同方向进入的初始路径方向;图 8 为接近障碍物时的路径;图 9 为规避空间障碍后顺利到达目标位置的路径。

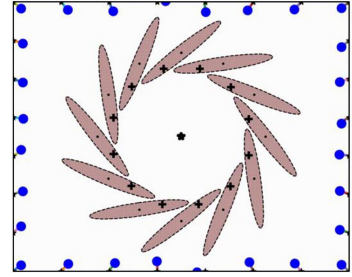


图 7 对静止多障碍规避路径规划的起始状态

Fig. 7 Initial state of static multi-obstacle avoidance path planning

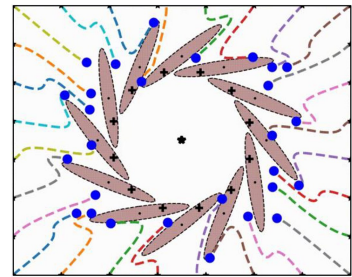


图 8 对静止多障碍规避路径规划的中间状态

Fig. 8 Intermediate state of static multi-obstacle avoidance path planning

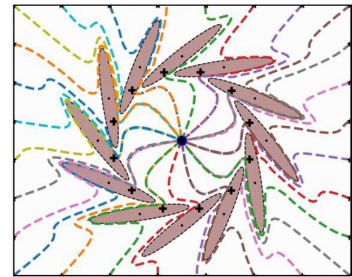


图 9 对静止多障碍规避路径规划的终点状态

Fig. 9 Terminal state of static multi-obstacle avoidance path planning

针对随机移动的两个空间障碍,运用本文算法进行了仿真。在仿真中,有两个椭圆障碍物在视场范围内随机移动,需要规划出能够实时规避障碍物的最佳路径。图 10 为由不同方向进入的初始路径方向;图 11 为遇到随机移动障碍路径生成的中间过程;图 12 为绕过障碍物到达目标点附近的规避路径。

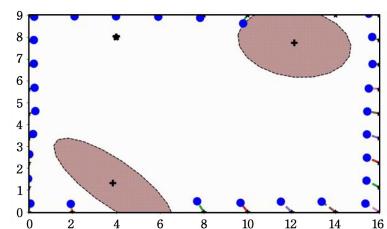


图 10 对动态多障碍规避路径规划的起始状态

Fig. 10 Initial state of dynamic multi-obstacle avoidance path planning

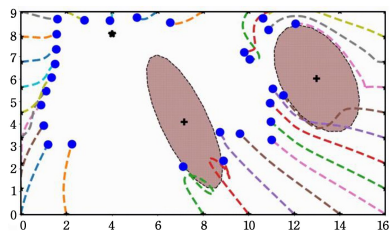


图 11 对动态多障碍规避路径规划的中间状态

Fig. 11 Intermediate state of dynamic multi-obstacle avoidance path planning

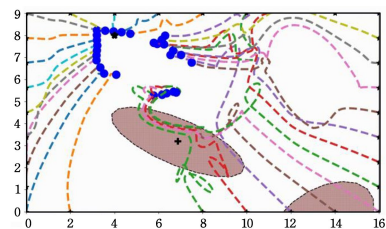


图 12 对动态多障碍规避路径规划的终点状态

Fig. 12 Final state of dynamic multi-obstacle avoidance path planning

结束语 本文提出了基于动态系统的多目标实时规避算法。该算法不再以障碍物的事前分析作为先决条件,而是以当前位置至障碍物的欧氏距离进行分析,能够直接根据当前状态计算调制矩阵,因此比其他需要障碍物表面分析的方法更简便。仿真实验表明,该算法能够有效应对空间静态以及动态障碍物,且不会陷入局部极小值。通过该算法,机器人能够进入物体周围安全区域之外的所有自由区域,从而使机器人到达目标的无碰撞路径相对较短。

参 考 文 献

- [1] CHEN J L, QIN X L, LI X L, et al. Multi-robot collaborative obstacle avoidance based on artificial potential field method [J/OL]. *Computer Science*, 1-10. [2020-08-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1075.TP.20200721.1702.098.html>.
- [2] CHAI H M, FANG M, LV S N. Local path planning of mobile robot based on situation assessment technology [J]. *Computer Science*, 2019, 46(4): 210-215.
- [3] XI F F, ZENG X, JI S M, et al. Path planning of mobile robot based on PG-RRT algorithm [J]. *Computer Science*, 2019, 46(4): 247-253.
- [4] LIU J, ZHAO H F, ZHOU D L. Improved quantum behaved particle swarm optimization algorithm for mobile robot path planning [J]. *Computer Science*, 2017, 44(S2): 123-128.
- [5] ZADEH S M K, BILLARD A. Learning stable nonlinear dynamical systems with gaussian mixture models [J]. *IEEE Trans. on Robotics*, 2011, 27(5): 943-957.
- [6] JSPEERT A J, NAKANISHI J, HOFFMANN H, et al. Dynamical Movement Primitives: learning attractor models for motor behaviors [J]. *Neural Computation*, 2013, 25(2): 328-373.
- [7] VAZQUEZ-OTERO A, FAIGL J, MUNUZURI A P. Path planning based on reaction-diffusion process [C] // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012: 896-901.
- [8] LUO Q, WANG H B, CUI X J, et al. Research on autonomous navigation system of warehousing mobile robot based on im-

proved artificial potential field method in dynamic environment [J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(3): 745-749, 762.

- [9] PENG Y, GUO W Q, LIU M, et al. Obstacle Avoidance Planning Based on Artificial Potential Field Optimized by Point of Tangency in Three-dimensional Space [J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(8): 1758-1762, 1768.
- [10] WANG W, WANG H. Real-time obstacle avoidance trajectory planning for missile borne air vehicle based on constrained artificial potential field method [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(7): 1738-1743.
- [11] CHEN T D, HUANG Y Y, WANG Z H. Collision-free path planning based on collision prediction [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2020, 40(4): 1057-1068.
- [12] LI J, YANG F, HAN Y F, et al. Research on robotic path planning based on dynamic gravitational field [J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(11): 41-46.
- [13] GUAN X M, LYU R L. Conflict Resolution Method for Multiple Aircraft Based on Hybrid Artificial Potential Field and Ant Colony Algorithm [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2020, 44(1): 28-33.
- [14] SHI Y F, ZHANG L, LIU Z X, et al. Research of Dynamic Obstacle Avoidance of Manipulator based on Artificial Potential Field Method of Velocity Field [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2020, 44(4): 38-44.
- [15] BROCK O, KHATIB O. Elastic strips: A framework for motion generation in human environments [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2002, 21(12): 1031-1052.
- [16] YOSHIDA E, KANEHIRO F. Reactive robot motion using path replanning and deformation [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2011: 5456-5462.
- [17] PARK D H, HOFFMANN H, PASTOR P, et al. Movement reproduction and obstacle avoidance with dynamic movement primitives and potential fields [C] // *The 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. 2008: 91-98.
- [18] HOFFMANN H, PASTOR P, PARK D H, et al. Biologically-inspired dynamical systems for movement generation: automatic realtime goal adaptation and obstacle avoidance [C] // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009: 2587-2592.
- [19] KHANSARI-ZADEH S M, BILLARD A. A dynamical system approach to realtime obstacle avoidance [J]. *Autonomous Robots*, 2012, 32(4): 433-454.
- [20] BLOOMENTHAL J, WYVILL B. *Introduction to Implicit Surfaces* [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1997.
- [21] CIMURS R, LEE J H, SUH I H. Goal-oriented obstacle avoidance with deep reinforcement learning in continuous action space [J]. *Electronics*, 2020, 9(3): 411-421.



WANG Wei-guang, born in 1980, post-graduate, lecture, is a member of China Computer Federation. His main research interests include information security and intelligent algorithm.