

基于等效杆件法的超冗余机器人规划仿真研究

王伟霖^{1,2},王成疆²,贾利慧¹,张鲁杨¹,刘力源¹,李玉胜¹,牟宗高^{1,2,3}

(1.山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255000;2.深圳市先进智能技术研究所,广东 深圳 518055;
3.哈尔滨工业大学(深圳) 机电工程与自动化学院,广东 深圳 518055)

摘要 具有运动灵巧等特性的超冗余机器人适宜在限制性环境开展作业,近年来受到广泛的关注。然而,由于大量自由度的存在,也使其逆运动学变得非常复杂。为了提高超冗余机器人在多障碍环境开展避障任务的能力,本文提出了等效杆件法求解超冗余机器人的逆运动学及避障轨迹规划问题。该方法根据回避工作空间内障碍物的特点,将超冗余的机器人逐次等效为低冗余或非冗余的机器人,将等效机器人与障碍物的位置关系作为避障判据,从而降低了避障规划的求解复杂度、提高了避障规划的效率。为了验证方法的有效性,基于 Webots 实现了对超冗余机器人和环境的建模,并实现编程控制和仿真。仿真结果证明了所提出的等效杆件法对超冗余机器人回避工作空间内障碍物的有效性。

关键词 超冗余机器人;避障规划;障碍物;等效杆件法

中图分类号 TP24

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research on Path Planning and Simulation of Hyper-Redundant Manipulators Based on Equivalent Links Method

WANG Weilin^{1,2}, WANG Chengjiang², JIA Lihui¹, ZHANG Luyang¹,
LIU Liyuan¹, LI Yusheng¹, MU Zonggao^{1,2,3}

(1.School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2.The Smartech Institute, Shenzhen 518055, China; 3.School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract Hyper-redundant manipulators have the characteristics of dexterous movement, and they are suitable for carrying out tasks in restrictive environment with many obstacles. In recent years, they have received extensive attention. However, due to the existence of a large number of degrees of freedom, their inverse kinematics have become very complicated. In order to improve the ability of hyper-redundant manipulator to carry out obstacle avoidance tasks in a multi-obstacle environment, the equivalent links method

收稿日期:2021-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(61903100);深圳战略新兴和未来产业发展资金(ZLZBCXLJZI20160805020017);2021年度大学生创新创业训练计划(202110433088);2020年度大学生创新创业训练计划(S202010433029;X202010433008X);教育部产学研合作协同育人项目(202002212025);深圳市基础研究专项(JCYJ20190806142818365)资助

通讯作者:牟宗高,男,汉,博士,副教授,研究方向:机器人规划及控制, E-mail: muzonggao@163.com。

is proposed to solve the inverse kinematics and obstacle avoidance trajectory planning of the hyper-redundant manipulator in this paper. According to the characteristics of avoiding obstacles in the working space, this method successively equates hyper-redundant manipulators to low-redundant or non-redundant manipulators. The position relationship between the equivalent links and the obstacle is used as the obstacle avoidance criterion, thereby reducing the complexity of solving obstacle avoidance planning and improving the efficiency of obstacle avoidance planning. In order to verify the effectiveness of the proposed method, the models of the hyper-redundant manipulator and environment are realized based on Webots, and the programming control and simulation are realized. The simulation results prove the effectiveness of the proposed equivalent links method for hyper-redundant manipulators to avoid obstacles in the work space.

Key words hyper-redundant manipulators; obstacle avoidance planning; obstacle; equivalent links method

0 引言

相比于传统的工业机器人,超冗余机器人具有更多的自由度、更纤细的工作臂杆和更灵巧的运动方式,因此超冗余机器人在狭小的工作环境表现出更优越的适应性和相容性。近年来,超冗余机器人得到了国内外专家学者的深入研究,并被广泛应用于狭小空间的作业任务^[1],例如:大型航天器设备的检测维修、核电站废墟环境的探生救援及狭小腔道环境的微创手术等。东京工业大学研制了一种包含 9 自由度的超冗余机器人^[2],该超冗余机器人不仅可以实现绕基座的转动及在空间的运动,而且可以发挥其拥有较多自由度的优势,灵活的避开工作范围内的多障碍物到达指定的空间位置,如图 1 所示。美国国防部高级研究计划局提出的“凤凰计划”^[3]中提出了开发下一代高灵巧性机器人的发展方向。该类超冗余机器人将具备照明和摄像等功能同时也将具有较大的工作空间以及障碍物回避等能力,如图 2 所示。日本国家信息和通信技术研究中心提出了轨道维护系统的概念^[4],该系统将完成对通信卫星的检修以及空间碎片的清理等工作,如图 3 所示。OC Robotics 公司推出了一种典型的超冗余机器人-型号 II-X125^[5]。该机器人臂杆直径为 125 mm,可在核电站等危险的狭小空间代替人类开展切割/焊接等作业任务。哈尔滨工业大学设计了一套应用于核电站狭小空间探测的超冗余机器人^[6,7]。该机器人有 18 个自由度可以灵活的进入狭小空间执行视频检测任务。香港中文大学设计了一款应用于微创手术的绳索驱动机器人^[8,9]。该机器人具有紧凑的结构,相对于连续型机器人具有更好的定位精度,实验中末端定位误差小于 4%。

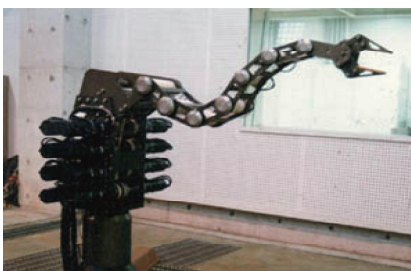


图 1 超冗余机器人灵巧运动

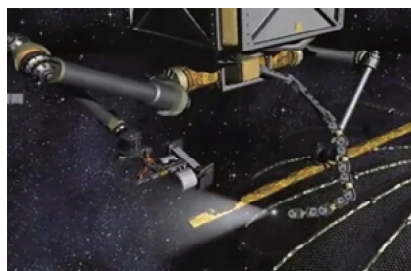


图 2 超冗余机器人在轨照明

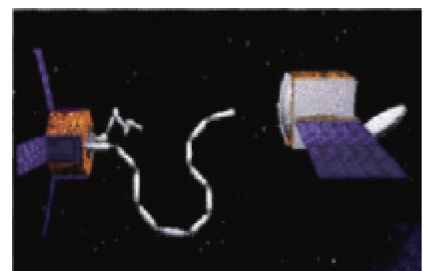


图 3 超冗余机器人在轨维护



图 4 超冗余机器人切割/焊接作业

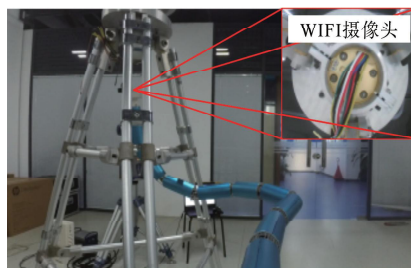


图 5 超冗余机器人视觉检测作业

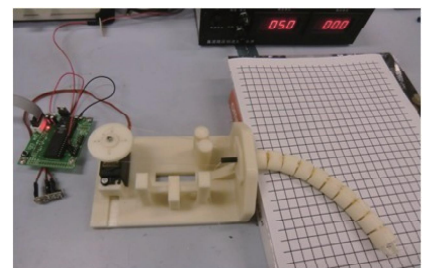


图 6 超冗余机器人微创手术应用

然而,由于大量自由度的存在,超冗余机器人的运动学逆解及轨迹规划将十分复杂,因此运动学逆解及

轨迹规划也成为超冗余机器人研究中的热点^[10-13]。Chirikjian 首先提出了脊线表征超冗余机器人宏观构型的思想^[14],当超冗余机器人宏观构型确定后,就可以依次确定每个关节的角度。Sunil 提出了使用圆弧表征超冗余机器人构型的思路^[15]。Samer 提出了一种从超冗余机器人无穷多解中确定唯一解的几何法^[16],由于该方法设定相邻关节角度相等,因此可以有效避免内部奇异。为了实现超冗余机器人的避障规划,Freund 提出了一种在线避障规划方法^[17],该方法使用了二次凸优化理论实现超冗余机器人的避障优化。Mayorga 提出了实现超冗余机器人避障的几何包围法^[18],该方法通过计算零空间及与障碍物包络的距离简单有效的实现了避障规划目标。Mu 等提出了使用超二次曲面方程建立障碍物模型,为冗余机器人避障规划提供判据的思路^[19, 20],该方法实现了冗余机器人在三维环境下多障碍物的避障规划。Xu 提出了应用等效模式函数法求解超冗余机器人逆运动学的思路^[21],该方法在避障方面具有较高的灵巧度,但在求解逆运动学时具有较高的复杂度。Mu 提出了分段几何法求解超冗余机器人的逆运动学的思路^[6],该方法提高了逆运动学的求解效率,但在避障规划中机器人的肘部只有四种构型可供选择,降低了超冗余机器人的灵巧性。

目前,在避障规划研究中为了获得障碍物回避的高效性,在障碍物建模方面通常采用圆或球等简单几何模型包络障碍物。而在避障算法优化方面还需要进一步研究超冗余机器人的逆运动学求解及轨迹规划问题。针对以上问题,本文提出了应用等效杆件法求解超冗余机器人的逆运动学及避障轨迹规划问题的思路。该方法根据超冗余机器人避障规划的特点将超冗余的机器人逐次等效为低冗余或非冗余的机器人,从而降低了避障规划的求解复杂度,提高了避障规划效率。本文首先介绍了等效杆件法的基本原理,并以二连杆等效杆件法为例介绍超冗余机器人的避障规划方法。然后基于 Webots 建立超冗余机器人的仿真系统,验证二连杆等效杆件法避障规划算法。最后总结全文并给出结论。

1 等效杆件法逆运动学及避障规划

一般情况下,障碍物都具有不规则的几何形状。本文针对平面障碍物,采用圆包络的方法进行描述。这种方法不仅建模简单而且可以适度扩大障碍物的空间,从而提高避障规划的计算效率及机器人运动路径的安全度,如图 7 所示。为了降低设计复杂程度,采用模块化思想设计超冗余机器人,使每个杆件的长度都是一致的。在传统几何法^[16]中相邻杆件之间的夹角均设定为相同,能有效避免相邻连杆共线的问题,因而体现出良好的避免内部奇异性。基于超冗余机器人的特点,本文提出了等效杆件法逆运动学及避障规划策略。在超冗余机器人的逆运动学求解方面可以将等效杆件法划分为二连杆等效杆件法和三连杆等效杆件法,如图 8 所示。二连杆等效杆件法(如图 8 虚线所示, n 为超冗余机器人自由度,本文设定 $n=6$)是以两个连杆为等效单位,将 n 自由度的机器人划分为 $(n/2)$ 个等效杆件。同理,三连杆等效杆件法(如图 8 双点线所示)是以三个连杆为等效单位,将 n 自由度的机器人划分为 $(n/3)$ 个等效杆件。在逆运动学求解时,基于等效杆件法可以将超冗余的机器人逐次等效为低冗余或非冗余的机器人,从而降低超冗余机器人的逆运动学的难度。在超冗余机器人的避障规划方面则将基于等效杆件法等效后的低冗余或非冗余机器人与障碍物的笛卡尔距离作为避障判据,通过判断等效后的低冗余或非冗余机器人与障碍物的距离大小就可以判断原超冗余机器人与障碍物的位置关系。因此,等效杆件法可以降低避障规划的求解复杂度、提高了避障规划的效率。

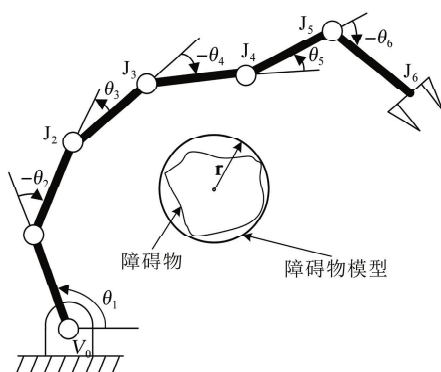


图 7 机器人及障碍物模型

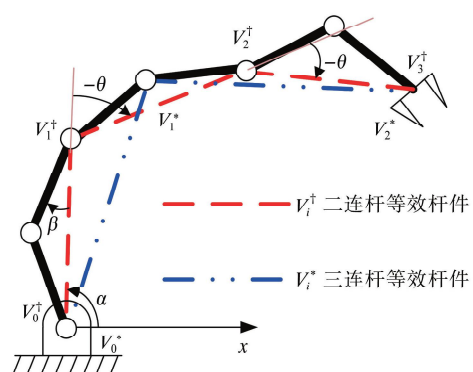


图 8 等效杆件法示意图

本文将以二连杆等效杆件法为例介绍超冗余机器人的逆运动学及避障规划原理。第一关节的角度 α (即图 8 X 轴与虚线 $V_0^+V_1^+$ 夹角), 第二、第三关节的角度均为 $-\theta$ (即图 8 虚线 $V_0^+V_1^+$ 延长线与 $V_1^+V_2^+$ 、红色虚线 $V_1^+V_2^+$ 延长线与 $V_2^+V_3^+$ 夹角), 机器人单一杆件的长度为 l_0 , 机器人与等效杆件的夹角为 β , 并且设定每根杆件与虚拟杆件之间的夹角都相等, 当给定末端点 V_3^+ 的坐标为 (x, y) , 则有

$$\begin{cases} x = L \cos \alpha + L \cos(\alpha - \theta) + L \cos(\alpha - 2\theta), \\ y = L \sin \alpha + L \sin(\alpha - \theta) + L \sin(\alpha - 2\theta), \end{cases} \quad (1)$$

其中 L 为等效杆件的杆长, 其值通过(2)式计算

$$L = 2l_0 \cos \beta. \quad (2)$$

显然, 当给定机器人与等效杆件之间的夹角 β , 依据分式(1)则可得出一组唯一确定的 α 和 θ 的解, 从而得出了等效杆件组的关节角度。进一步, 可以依据公式(3)求得超冗余机器人各个关节的角度。

$$\begin{cases} \theta_1 = \alpha + \beta, \\ \theta_2 = \theta_4 = \theta_6 = -2\beta, \\ \theta_3 = \theta_5 = 2\beta - \theta. \end{cases} \quad (3)$$

对于超冗余机器人在障碍物环境中工作, 还需要研究的一个重要指标是其工作空间。工作空间由超冗余机器人的自由度数目、关节角度极限和杆件长度共同决定。通常应用蒙特卡罗法绘制机器人的工作空间。根据公式(1)可知, 末端执行器的位置是关节角度的函数, 可以简写为

$$X = f(\theta), \quad (4)$$

其中关节角度满足 $\theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$, ($i = 1, 2, \dots, 6, \theta_{\min} = -85^\circ$, $\theta_{\max} = 85^\circ$)。对每个关节变量, 在其规定的范围内, 随机抽取 500 个值可得具体参数

$$\theta_i = \theta_{\min} + (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \times \text{RAND}(500, 1), \quad (5)$$

则应用蒙特卡罗法, 对所有角度组合, 采用循环(多重循环)语句依次将各关节变量值组合代入运动学正解方程, 绘制工作空间如图 9 所示。

在工作空间范围内, 则可以确定超冗余机器人每个杆件的位置。并通过判断杆件所在线段与障碍物包络圆交点是否存在, 作为确定杆件是否会与障碍物发生碰撞的判据。当会发生碰撞时,

则改变机器人与虚拟杆件的夹角 β , 从而改变机器人的姿态来实现避障, 其具体算法流程如图 10 所示。

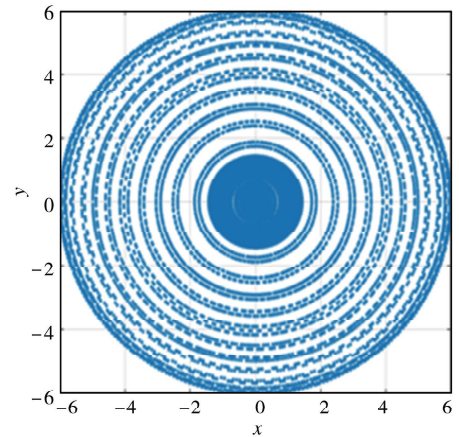


图 9 超冗余机器人工作空间

2 基于 Webots 的仿真实验

2.1 仿真系统架构

Webots 可以实现对机器人和环境进行建模, 并能够进行编程、控制和仿真。在 Webots 软件中, 用户可以快速创建三维虚拟环境, 并赋予环境及环境中物体相应的物理属性, 如光照强度、颜色、形状、质量、摩擦系数等, 从而实现十分接近地模拟机器人现实的工作环境。Webots 软件界面包含 4 个主要的窗口: 场景树、三维窗口、代码区和控制台。在这些窗口中分别可以实现建模、显示、编程和仿真等功能。图 11 为仿真平台搭建的基本流程。本文采用 MATLAB 语言编写控制程序。将规划好的关节角度数据储存于 txt 文档中, 在运行程序时通过 `textread` 函数读取关节角度数据; 另外通过 `wb_robot_get_device` 函数获取设备标签, 并通过 Webots 中名称为 `wb_motor_set_position` 的函数设置电机对应的关节角度, 在每设置完一组电机关节角度之后, 采用 `wb_robot_step` 函数实现控制台和仿真窗口之间数据的更新, 搭建完成的 Webots 仿真模型如图 12 所示。为了验证模型的适用性, 首先规划出超冗余机器人末端运动的圆轨迹及对应关节角度, 然后使用关节角度控制超冗余机器人运动, 通过 Webots 系统传感器获得超冗余机器人末端的位置数据。分别绘

制期望末端位置 and 实际末端位置如图 13 所示。图中虚线为规划的末端轨迹圆,实线为传感器测得的末端轨迹圆。实线与虚线具有较好的重合度,说明了超冗余机器人 Webots 仿真系统的适用性。

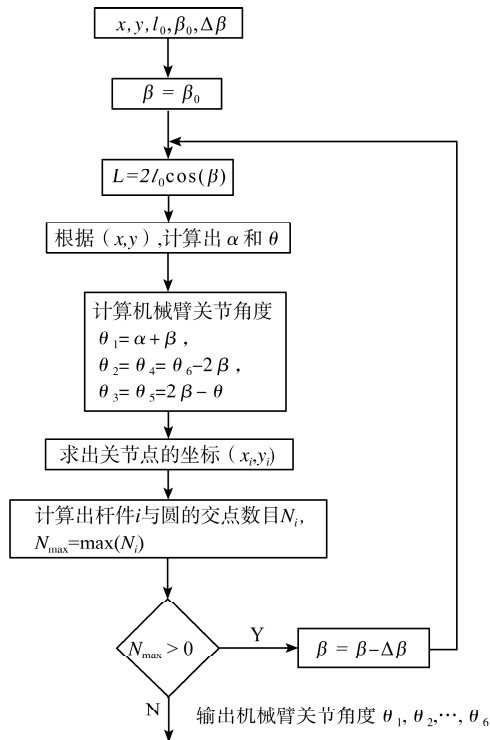


图 10 障碍物避障算法流程图

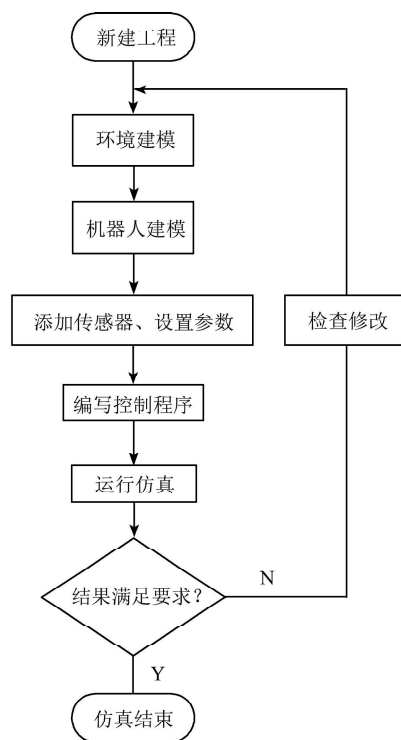


图 11 仿真平台搭建流程

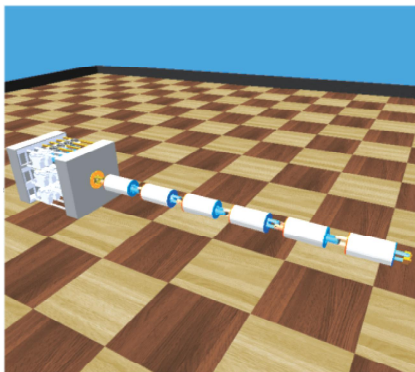


图 12 超冗余机器人 Webots 仿真模型

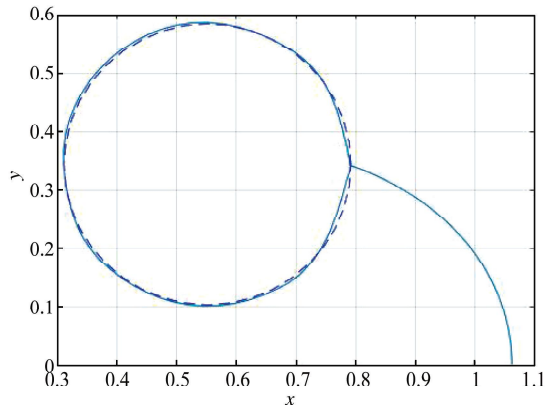


图 13 末端圆运动轨迹

2.2 避障运动仿真

本文基于建立的超冗余机器人 Webots 仿真模型验证提出的等效杆件法避障规划方法。当存在障碍物时,需要提前判断超冗余机器人运动的下一个构型是否会与障碍物发生碰撞。如果判断出超冗余机器人的下一个构型有碰撞则需要重新选择一组满足要求的构型角度。本文基于提出的等效杆件法避障算法规划合理的避障轨迹,在 Webots 仿真系统中验证所规划路径的有效性。

在单障碍物避障规划仿真中,设定超冗余机器人与障碍物之间的相对位置关系如图 14

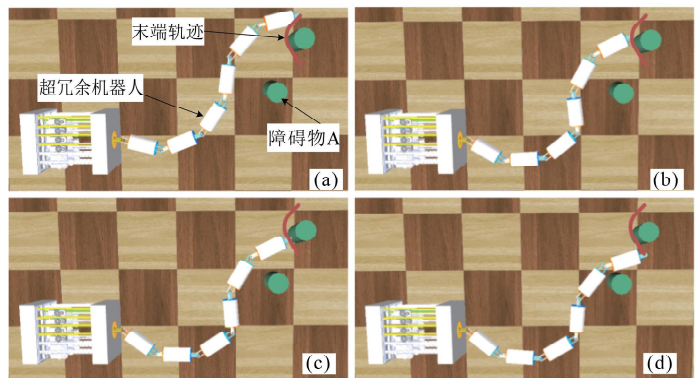


图 14 单障碍物避障规划仿真

所示。超冗余机器人在灵活地避开单障碍物的同时沿着规划的末端轨迹到达了期望位置。

在多障碍物避障规划仿真中增加障碍物的数量同时改变障碍物与超冗余机器人的相对位置,具体末端的运动轨迹和多障碍物的分布如图 15 所示,从图 16 的运动轨迹可看出机器人末端按照规划的“直线—圆弧—直线”的路径进行运动,并且轨迹在虚线圆外部。超冗余机器人的末端及臂杆不与障碍物发生碰撞,证明了所提出的等效杆件法对超冗余机器人回避工作空间内障碍物的有效性。

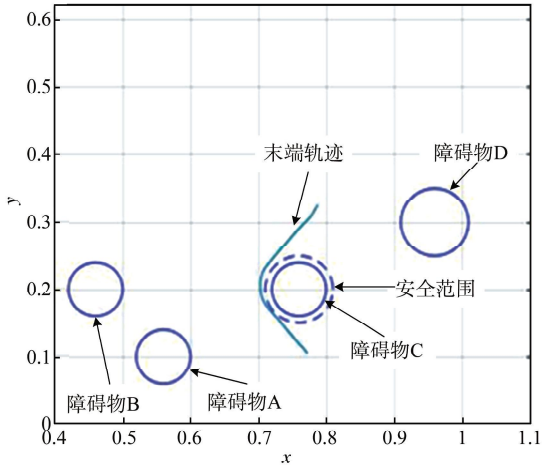


图 15 多障碍物位置及末端轨迹

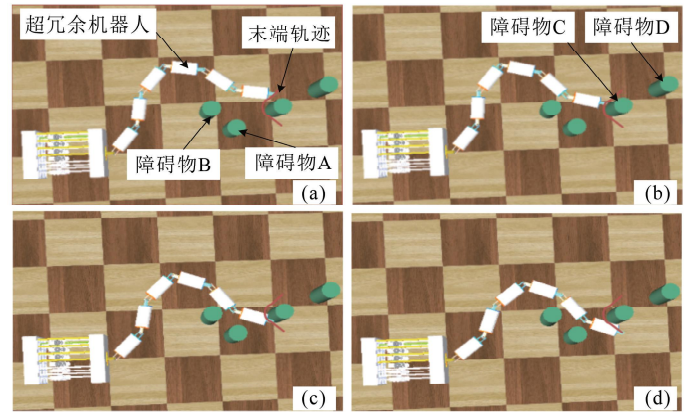


图 16 多障碍物避障规划仿真

3 结论

本文提出的等效杆件法解决了超冗余机器人的逆运动学及避障轨迹规划问题。该方法的主要思想是将超冗余的机器人等效为低冗余或非冗余的机器人;然后,根据在工作空间内障碍物的特点将不规则的障碍物使用圆进行包络,通过判断包络圆与等效机器人的相交点个数判断是否发生碰撞,根据碰撞的判断结果调整超冗余机器人的运动构型,从而降低了避障规划的求解复杂度并且提高了避障规划的效率。为了验证方法的有效性,本文基于 Webots 实现了对超冗余机器人和环境的建模,基于等效杆件法完成了超冗余机器人回避多障碍物的编程控制和系统仿真。仿真结果证明了所提出的等效杆件法对超冗余机器人回避工作空间中障碍物的有效性。

参 考 文 献

- [1] MENON M S,RAVI V C,GHOSAL A.Trajectory planning and obstacle avoidance for hyper-redundant serial robot[J].Journal of Mechanisms and Robotics,2017,9(4):41010.
- [2] MA S,HIROSE S,YOSHINADA H.Development of a hyper-redundant multijoint manipulator for maintenance of nuclear reactor[J].Advanced Robotics,1995,9(6):281-300.
- [3] BARNHART D,SULLIVAN B,HUNTER R,et al.Phoenix Project Status 2013[C].// AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, 2013.
- [4] KIMURA S,NAGAI Y,YAMAMOTO H.Approach for on-orbit maintenance and experiment plan using 150 kg-class satellites[C].// Aerospace Conference,2005.
- [5] BUCKINGHAM R.Snake arm robots[J].Industrial Robot: An International Journal,2002,29(3):242-245.
- [6] MU Z,YUAN H,XU W, et al.A segmented geometry method of inverse kinematics resolving and configuration planning for spatial hyper-redundant manipulators[J].IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Systems,2020,50(5):1746-1756.
- [7] LIU T,MU Z,WANG H.A Cable-Driven Redundant Spatial Manipulator with Improved Stiffness and Load Capacity[C].// 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS),2018.
- [8] LI Z,DU R.Design and analysis of a bio-inspired wire-driven multi-section flexible robot regular paper[J].International Journal of Ad-

- vanced Robotic Systems,2013,10(10):209-220.
- [9] LI Z,DU R,LEI M C,et al.Design and Analysis of a Biomimetic Wire-Driven Robot Arm[C].//ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition,2011.
- [10] LIMA J,PEREIRA A I,COSTA P,et al.A Fast and Robust Kinematic Model for a 12 DoF Hyper-redundant Robot Positioning: An Optimization Proposal[C].//International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics,2017.
- [11] BAYANI S,RASTEGARI R,SAMAVATI F C.Kinematic Modeling of Hyper-redundant Robot Using Ball Screw Mechanism Approach [C].//Artificial Intelligence and Robotics(IRANOPE),2017.
- [12] ZHAO J,ZHAO L,WANG Y.A Novel Method for the Motion Planning of Hyper-redundant Manipulators Based on Monte Carlo[C].//Lecture Notes in Electrical Engineering,2017.
- [13] ALIREZA M,HASSAN Z,HABIBNEJAD K M.A new motion planning method for discretely actuated hyper-redundant manipulators[J].Robotica,2015,35(1):101-118.
- [14] CHIRIKJIAN G S,BURDICK J W.A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics[J].IEEE Transactions on Robotics and Automation,1994,10(3):343-354.
- [15] AGRAWAL S K,LI S,ANNAPRAGADA M.Hyper-redundant Planar Manipulators: Motion Planning with Discrete Modal Summation Procedure[C].//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation,1994.
- [16] SAMER Y,MOHAMED H A F,MAHMOUD M.A new geometrical approach for the inverse kinematics of the hyper redundant equal length links planar manipulators[J].Engineering Transactions,2009,12(2):109-114.
- [17] FREUND E,SCHLUSE M,ROSSMANN J.Dynamic Collision Avoidance for Redundant Multi-robot Systems[C].//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,2001.
- [18] MAYORGA R V.A Geometrical Bounded Method for the On-line Obstacle Avoidance of Redundant Manipulators[C].//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1997.
- [19] MU Z,YANG Y,XU W,et al.Collision-free Trajectory Planning of Redundant Space Manipulators Based on Pseudo-distance[C].//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation,2014.
- [20] MU Z,XU W,LIANG B.Avoidance of multiple moving obstacles during active debris removal using a redundant space manipulator[J].International Journal of Control, Automation and Systems,2017,15(2):815-826.
- [21] XU W,MU Z,LIU T,et al.A modified modal method for solving the mission-oriented inverse kinematics of hyper-redundant space manipulators for on-orbit servicing[J].Acta Astronautica,2017,139:54-66.