

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201710001



非均匀有理 B 样条的挖掘机器人 作业过程中自主避障控制

钟星^{1,2}, 邵辉^{1,2}, 胡伟石³, 聂卓赞^{1,2}

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;
3. 华侨大学 实验室与设备管理处, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决挖掘机器人在作业过程中遇到大障碍物时无法及时调整动作的问题, 提出一种基于非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线的轨迹规划方法. 利用 3 次 NURBS 曲线插值实现特定的挖掘曲线, 在与大障碍物发生碰撞时, 通过调整权重因子改变挖掘机器人的局部挖掘轨迹, 并且保证轨迹具有良好的平滑性和连续性. 仿真实验表明: 所提的轨迹规划方法能够实时调整铲斗位姿, 进而改变挖掘路径, 使挖掘机器人成功避开障碍物, 实现自主平滑挖掘.

关键词: 挖掘机器人; 轨迹规划; 非均匀有理 B 样条; 避障

中图分类号: TU 621 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)01-0026-08

Autonomous Obstacle Avoidance Controlling of Robotic Excavators in Operation Process of Non-Uniform Rational B-Spline

ZHONG Xing^{1,2}, SHAO Hui^{1,2}, HU Weishi³, NIE Zhuoyun^{1,2}

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. Department of Laboratory and Device Management, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to solve the problem that the excavator bucket cannot be adjusted in real time when it crashed into a large obstacle, a trajectory planning method based on the non-uniform rational B-spline (NURBS) curve was proposed for robotic excavators. By using the cubic NURBS curve interpolation a specific mining curve was achieved. While the bucket collided with a big obstacle, by adjusting the weight factor the robot's local excavation trajectory was changed to ensure a smooth and continuous track. Simulation results show that the proposed trajectory planning method is effective for adjusting bucket posture in real time, and then changing mining path. As a result, the excavating robot has abilities to avoid obstacles and automatically complete smooth excavation.

Keywords: excavation robot; trajectory planning; non-uniform rational B-spline; obstacle avoidance

收稿日期: 2017-10-09
通信作者: 邵辉(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事机器人控制、运动规划、智能控制和非线性系统 LPV 建模的研究. E-mail: shaohuihu11@163.com.
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61403149); 教育部第 48 批留学回国人员科研启动项目(Z1534004); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01117); 福建省泉州市科技计划项目(2017T001)

液压挖掘机是工程建设中应用最为广泛的工程机械之一,国内外学者对其自动化进行了广泛的研究^[1]. Peyreta 等^[2]提出一种用于执行复杂的挖掘运动和参数化控制的实时轨迹规划方法. 杨毅等^[3]研究挖掘机器人在运土过程中,利用超声波测距传感器构造“虚拟阻力区”,采用阻抗控制实现障碍的自主回避. Saeedi 等^[4]提出基于视觉的挖掘机控制系统,采用模糊逻辑方法控制路径跟踪,针对挖掘过程中可能出现的错误路径,运用交叉耦合控制器进行校正. 邵辉等^[5]提出一种基于原像规划和下层前向搜索的两级挖掘机轨迹规划方法. 李海虹等^[6]利用 3-3-5-3-3 多项式插值法进行轨迹规划. 挖掘机器人的铲斗末端轨迹具有复杂的空间曲线特性^[7],单一的多项式既难以表达,也难以胜任挖掘机器人在实际工况中的局部复杂轨迹^[8-13]. 挖掘机的轨迹规划是基于作业任务要求,设计合适的机械臂末端执行器轨迹,作业任务通常只是一些关键点的数据,而轨迹规划则需要依据这些数据设计出合适的运行轨迹. 近年来,在工程应用领域中,非均匀有理 B 样条(NURBS)越来越被重视. NURBS 曲线的优点有:局部修改性、移动控制顶点、调整节点矢量或改变权重因子仅影响 NURBS 曲线的局部形状,并不影响整体轨迹的性能^[14-15]. 利用 NURBS 曲线按照挖掘机器人的作业任务要求进行轨迹规划,可以得到连续的挖掘轨迹曲线,且能进行局部调节,适合挖掘机器人化控制^[16]. 本文针对已有研究存在的缺点,根据反铲斗挖掘机机器人化作业特点,提出一种基于 NURBS 的挖掘机器人自主控制轨迹规划方法^[17].

1 系统概述

挖掘机器人的总体结构包括动力装置、工作装置、回转机构等. 文中主要研究挖掘过程,该过程由挖掘机器人的工作装置(包括动臂、斗杆、铲斗)完成,以 ZAXIS120 型液压挖掘机为研究对象. 为便于研究,忽略动臂、斗杆、铲斗的具体形状,采用简单的线条表示. 将工作装置近似为 3 自由度的空间连杆机构,在动臂、斗杆和铲斗关节处安装角度传感器^[18],各杆件参数与坐标系,分别如表 1 和图 1 所示. 表 1 中: α_i 为扭角; a_i 为连杆长度; d_i 为连杆偏置. 图 1 中: α 为动臂关节角度; β 为斗杆关节角度; δ 为铲斗关节角度; a_1 为动臂长度; a_2 为斗杆长度; a_3 为铲斗长度.

表 1 挖掘机性能参数
Tab. 1 Parameters of hydraulic excavator

序号	$\alpha_i / (^{\circ})$	a_i / mm	d_i / mm	关节角变化范围/ $(^{\circ})$
1	0	4 600	0	-71~45
2	0	2 519	0	30~152
3	0	1 230	0	-33~145

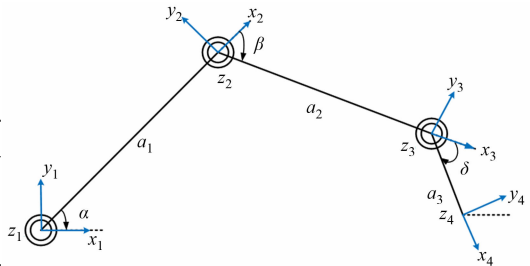


图 1 液压挖掘机工作装置坐标示意图
Fig. 1 Schematic diagram of coordinate system of hydraulic excavator

2 基于 NURBS 曲线轨迹规划

2.1 NURBS 曲线

NURBS 采用控制顶点(D_i)、节点矢量(U_i)及权重因子(ω_i)定义自由曲线. 据《初始化图形交换规范》(IGES)规定,分段有理多项式矢函数是由 n 个控制顶点定义的一条 k 次 NURBS 曲线^[19-20],即

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} N_{i,k}(u) \omega_i D_i}{\sum_{i=0}^{n-1} N_{i,k}(u) \omega_i}, \quad k \geq 1. \tag{1}$$

式(1)中: $C(u)$ 为参数曲线; $N_{i,k}(u)$ 为由节点矢量 $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 定义的 k 次 B 样条基函数.

利用 k 次 B 样条基函数的 Cox-de Boor 递推公式,定义在节点矢量 U 上的 k 次基函数递推为

$$N_{i,0} = \begin{cases} 0, & u_i \leq u \leq u_{i+1}, \\ 1, & \text{其他.} \end{cases} \tag{2}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u), \quad k \geq 1. \tag{3}$$

式(2),(3)中: u_i 为节点. 同时,规定 $0/0=0$.

2.2 均匀介质环境下的轨迹规划

轨迹规划是指根据作业任务的要求,确定轨迹参数,并实时计算和生成运动轨迹. 在均匀介质环境下,拟利用 NURBS 曲线具有 $n-1$ 次可导的性质,且每个控制点都具有权重调节因子的特性对铲斗末

端轨迹进行规划,采用积累弦长参数化方法拟合 NURBS 曲线^[21],以确保挖掘轨迹平稳连续.根据挖掘任务要求,按照如下 6 个步骤进行轨迹规划.

步骤 1 依据作业要求,选取 n 个控制顶点 D_i ,首末端控制顶点一般作为挖掘起始点、终止点,再选取 $n-2$ 个曲线关键点.其中, $i>0,D_i>0$.

步骤 2 确定节点矢量 $U=\{\underbrace{\alpha,\cdots,\alpha}_{k+1};u_{k+1},\cdots,u_{n-k-1};\underbrace{b,\cdots,b}_{k+1}\}$.通常情况,令 $a=0,b=1$,以保证生成的 NURBS 曲线通过首末端控制点.

步骤 3 采用积累弦长参数化方法,计算参数值 u_{k+1},\cdots,u_{n-k-1} .

步骤 4 设定各控制顶点权重因子 ω_i .其中: $i,\omega_i>0$.

步骤 5 采用 Cox-de Boor 递归公式,求解 B 样条基函数 $N_{i,k}(u)$.

步骤 6 利用带权控制顶点矩阵,计算离散轨迹点,并拟合出符合作业要求的 NURBS 曲线.

以挖掘机器人进行梯形深坑的挖掘为例.挖掘过程主要包括铲斗铲入土壤、拖拽、回旋提升 3 个步骤^[6].选择使用 3 次 NURBS 曲线规划挖掘轨迹,指定铲斗末端轨迹曲线的 7 个控制顶点坐标 $D_i=[7\ 000,0;6\ 750,-500;6\ 500,-620;6\ 000,-650;5\ 500,-620;5\ 250,-500;5\ 000,0](i=0,1,2,\cdots,6)$,节点 $U=[0,0,0,0,0,0.209\ 0,0,0.312\ 7,0.500\ 0,0.687\ 3,0.791\ 0,1,1,1,1]$.当各控制顶点权重因子 $\omega_i=[1,1,1,1,1,1,1](i=1,2,3,\cdots,9)$ 时,铲斗末端曲线,如图 2 所示.图 2 中: H 为挖掘深度; l 为挖掘长度.

整个作业过程中,挖掘机器人各关节角度变化和挖掘姿态角变化,如图 3 所示.图 3 中: ε 为挖掘姿态角度变化.由图 3 可知:各角度变化均处于机械结构可达范围,无大突变,挖掘姿态满足机械结构的几何约束,符合挖掘机器人在挖掘过程中的基本性能要求.由此表明:该轨迹规划方法具有可行性,同时也为进一步研究挖掘机器人在非均匀介质土壤环境下的轨迹规划提供理论依据.

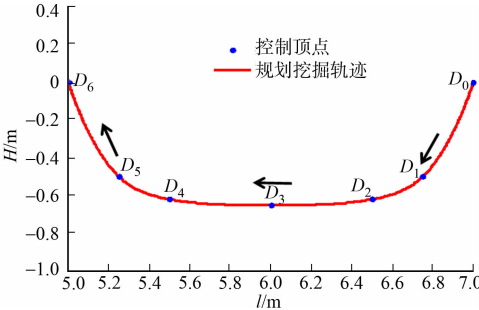


图 2 铲斗末端轨迹曲线
Fig. 2 Bucket end trajectory curve

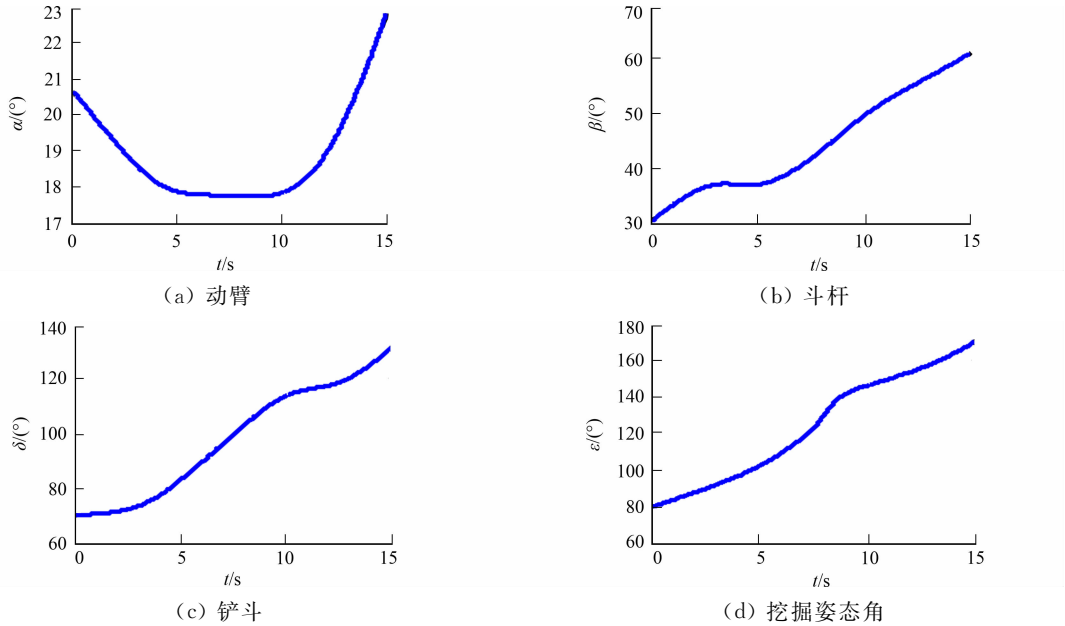


图 3 挖掘机器人各关节角度及挖掘姿态角变化曲线
Fig. 3 Joint angle and mining attitude angle curves of robotic excavator

3 自主避障轨迹规划

在有大障碍物的非均匀介质土壤环境中,挖掘机器人不可避免地会与障碍物发生碰撞.因此,避开障碍物到达预定的目的地是实现机器人智能化、自动化操作的重要条件之一.传统的轨迹规划方法不

存在可供调整的参数,无法对挖掘轨迹进行及时有效地调节.而基于 3 次 NURBS 的挖掘机器人轨迹规划中,利用 NURBS 曲线具有可调整控制顶点权重因子的优势,从而实现对挖掘轨迹曲线的局部优化.

为便于研究,在以下 3 种约束条件下进行避障讨论:1) 在非均质介质环境下,土壤介质环境未超出挖掘机的挖掘能力;2) 主要讨论 $D_0 \sim D_2$ 及 $D_4 \sim D_6$ 阶段存在的障碍物情况;3) 避障过程中,挖掘机器人各关节角调整处于产生足够挖掘力的合理变化范围,且能够顺利避开障碍物,完成平滑挖掘.

当障碍物位于铲斗尖走行的方向,铲斗所受走行阻力将最大,易造成挖掘受阻或铲尖损坏.因此,文中讨论在这种情况下避障平滑规划,运用一种在未知环境下执行操作规划的机器人算法(原像规划),使铲尖脱离障碍物.挖掘机器人在挖掘过程中,受到障碍物产生的反作用力,挖掘阻力发生突变,如图 4 所示.图 4 中: F 为与障碍物发生碰撞时铲斗外载荷; V_c 为铲斗运动速度; γ 为铲斗运动速度方向与碰到障碍物时铲斗外载荷方向的夹角; obs 为障碍物.

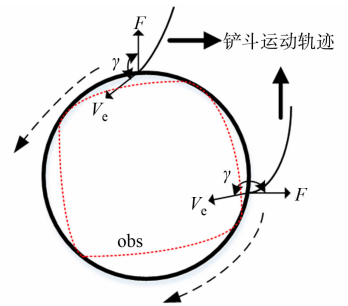


图 4 原像规划示意图

Fig. 4 Schematic diagram of preimage planning

在挖掘过程中,不考虑意外出现的障碍物,根据压力和位移传感器的反馈信息,在碰到 obs 时,通过对铲斗运动速度方向 V_c 和碰到障碍物时,铲斗外载荷方向 F 的夹角 γ 进行判断^[5]:1) 当 $\gamma < \gamma_h$ 时,调整距离障碍物最近的控制顶点权重因子 ω_2 或 ω_8 ;2) 当 $\gamma_h \leq \gamma$ 时,调整距离障碍物最近的控制顶点权重因子 ω_3 或 ω_7 . 其中, γ_h 为阈值,可通过实测获得.另外,当铲斗背与障碍物发生碰撞时,考虑挖掘机的挖掘力可将障碍物推开,不会对挖掘过程有过大的冲击;而随着挖掘的深入,障碍物将被铲入铲斗中,不会对挖掘过程有过大的冲击,也不会对铲尖有过大的损伤,从而提高挖掘效率并增加挖掘机的机械寿命.

挖掘机器人基于 NURBS 的自主避障轨迹规划的具体步骤,如图 5 所示.

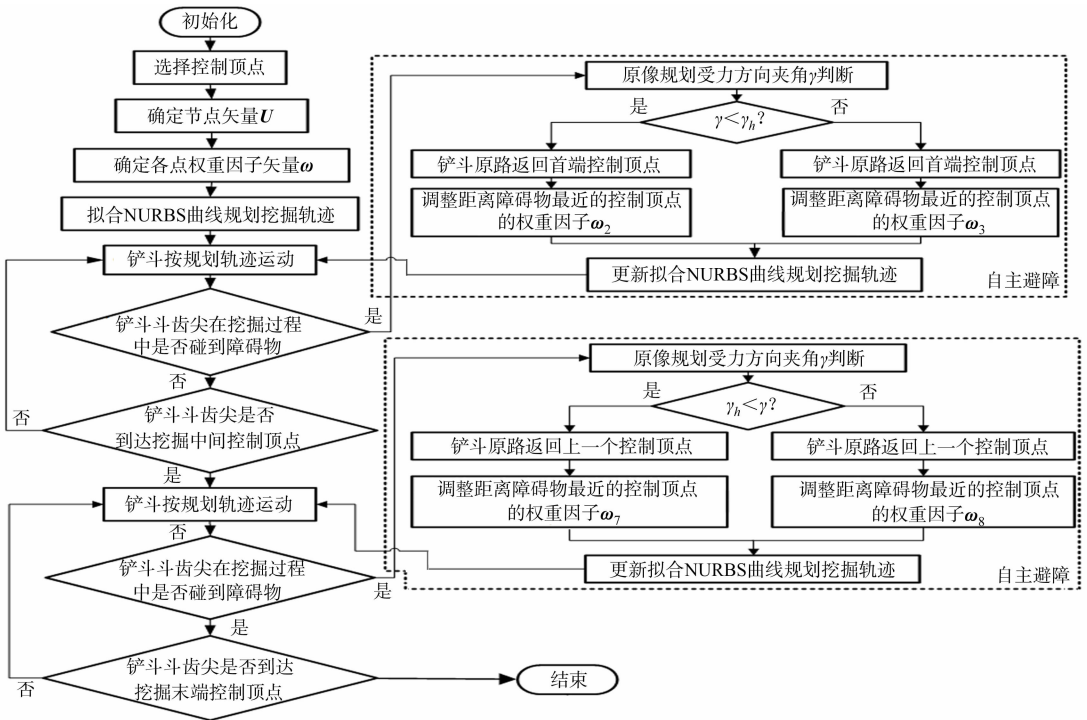


图 5 避障轨迹规划流程图

Fig. 5 Flow chart of obstacle avoidance trajectory planning

4 仿真试验和结果分析

利用 Matlab 软件进行编程验证,将障碍物分别设置在 4 处挖掘轨迹必经区域,如图 6 所示.

情况 I 图 6(a)中:铲入挖掘阶段($\omega_2 = 2$),障碍物大部分区域位于轨迹走行的下方,选取其中一

例设置中心点为(6.85 m,−0.55 m),半径为 0.15 m.

情况Ⅱ 图 6(b)中:铲入挖掘阶段($\omega_3=2$),障碍物大部分区域位于轨迹走行的上方,选取其中一例设置中心点为(6.70 m,−0.38 m),半径为 0.15 m.

情况Ⅲ 图 6(c)中:回转提升阶段($\omega_8=4$),障碍物大部分区域位于轨迹走行的下方,选取其中一例设置中心点为(5.15 m,−0.54 m),半径为 0.15 m.

情况Ⅳ 图 6(d)中:回转提升阶段($\omega_7=2$),障碍物大部分区域位于轨迹走行的上方,选取其中一例设置中心点为(5.30 m,−0.38 m),半径为 0.15 m.

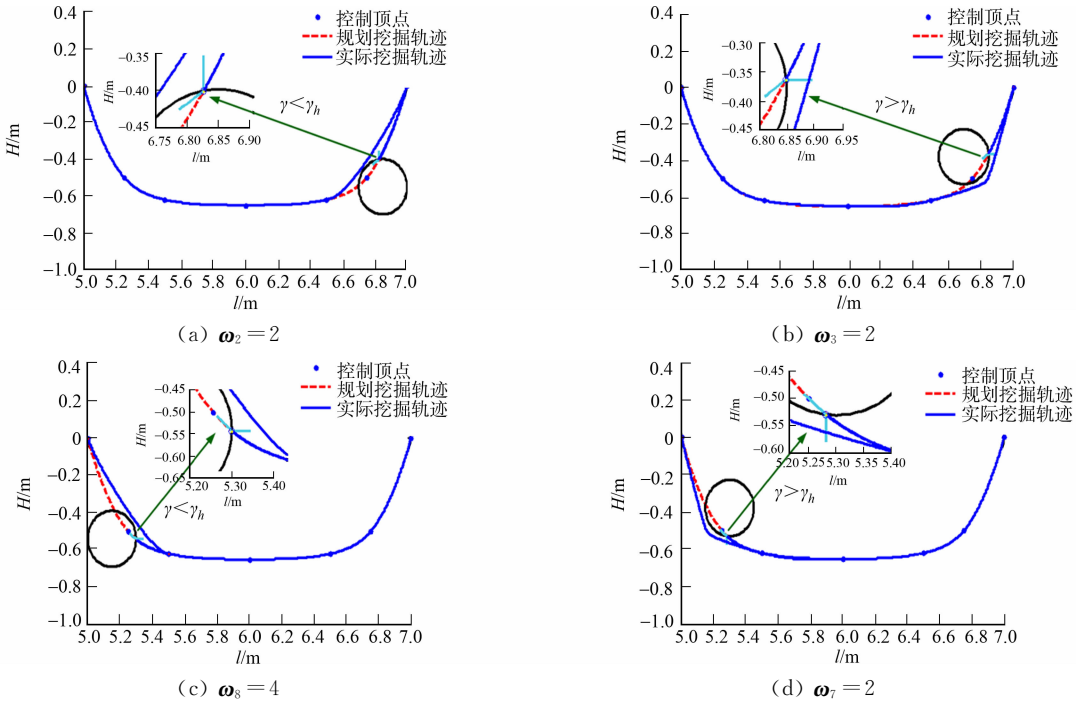


图 6 挖掘机器人避障轨迹曲线

Fig. 6 Trajectory curve of robotic excavator with obstacle avoidance

基于 3 次 NURBS 挖掘机器人在均匀介质中进行梯形深坑规划的轨迹运动(图 2),当与障碍物发生碰撞时,通过基于 NURBS 的局部轨迹规划对铲斗位姿进行实时调整,以满足特定工况条件下的作业要求.其仿真试验结果,分别如图 7~10 所示.

由图 6(a)与图 7 可知:在 1.896 8 s 时,挖掘机器人铲斗碰撞到设定的障碍区域,测得 $\gamma < \gamma_h$,铲斗返回首端点,各关节也随之运动到初始姿态;在 3.793 6 s 到达首端控制顶点时,保持其他控制顶点的权重因子不变的情况下,仅通过调整距离障碍最近的控制顶点 D_1 的权重因子 ω_2 调整铲斗位姿,进而改变铲斗末端轨迹和挖掘路径,使轨迹曲线上的点朝着远离控制顶点 D_1 的方向运动;当 $\omega_2=2$ 时,挖掘轨迹完全离开障碍区域,挖掘机器人成功避开障碍物,在整个运动过程中,挖掘机器人各关节角度和挖掘姿态角变化均符合机械结构的要求.

由图 6(b)与图 8 可知:在 1.674 8 s 时,挖掘机器人铲斗碰撞到设定的障碍区域,测得 $\gamma > \gamma_h$,铲斗返回首端点;在 3.349 6 s 到达首端控制顶点时,调整权重因子 ω_3 ;当 $\omega_3=2$ 时,挖掘机器人成功避开障碍物,在整个运动过程中,挖掘机器人各关节角度和挖掘姿态角变化均符合机械结构的要求.

由图 6(c)与图 9 可知:在 12.478 9 s 时,挖掘机器人铲斗碰撞到设定的障碍区域,测得 $\gamma < \gamma_h$,铲斗返回 D_4 控制顶点;在 14.957 8 s 到达 D_4 时,调整权重因子 ω_8 ;当 $\omega_8=4$ 时,挖掘机器人成功避开障碍物,在整个运动过程中,挖掘机器人各关节角度和挖掘姿态角变化均符合机械结构的要求.

由图 6(d)与图 10 可知:在 12.604 7 s 时,挖掘机器人铲斗碰撞到设定的障碍区域,测得 $\gamma > \gamma_h$,铲斗返回 D_4 控制顶点;在 15.209 4 s 到达 D_4 时,调整权重因子 ω_7 ;当 $\omega_7=2$ 时,挖掘机器人成功避开障碍物,在整个运动过程中,挖掘机器人各关节角度和挖掘姿态角变化均符合机械结构的要求.

结合挖掘机控制结构进行仿真,自主避障规划轨迹在机械结构的可达范围内,在动作过程中,挖掘

姿态满足机械结构的几何约束. 结果证明文中方法具有光滑连续的挖掘路径. 在一些典型挖掘过程中, 基于 3 次 NURBS 曲线具有局部修改性和 C^2 连续性的特征, 使挖掘机器人能够根据实际工作情况实时修正预期的挖掘轨迹, 从而保证挖掘机器人工作的高效性.

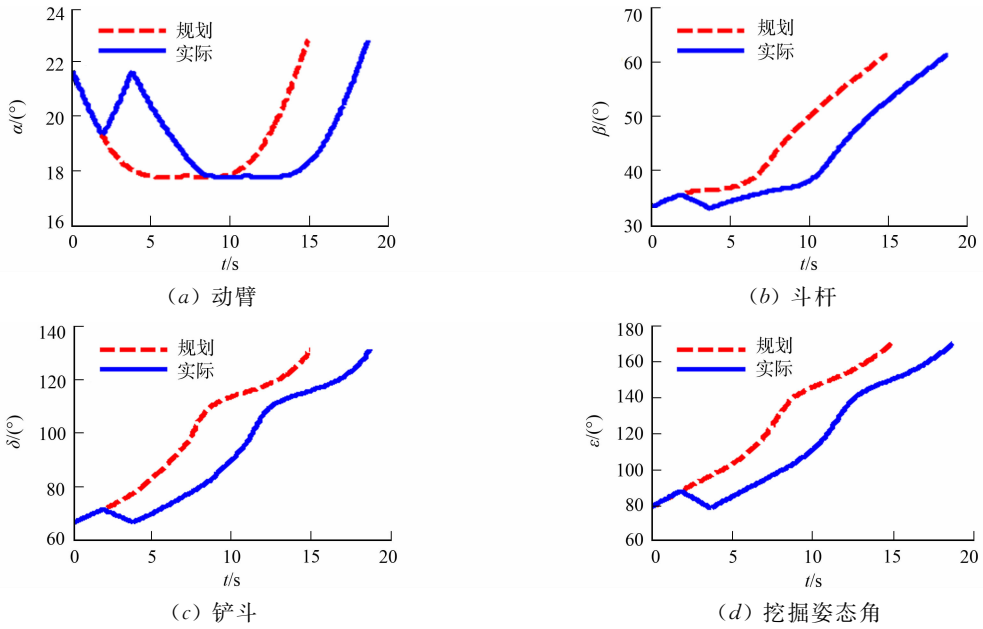


图 7 $\omega_2=2$ 时, 挖掘机器人各关节角度及挖掘姿态角变化曲线

Fig. 7 Joint angle and mining attitude angle curves of robotic excavator when $\omega_2=2$

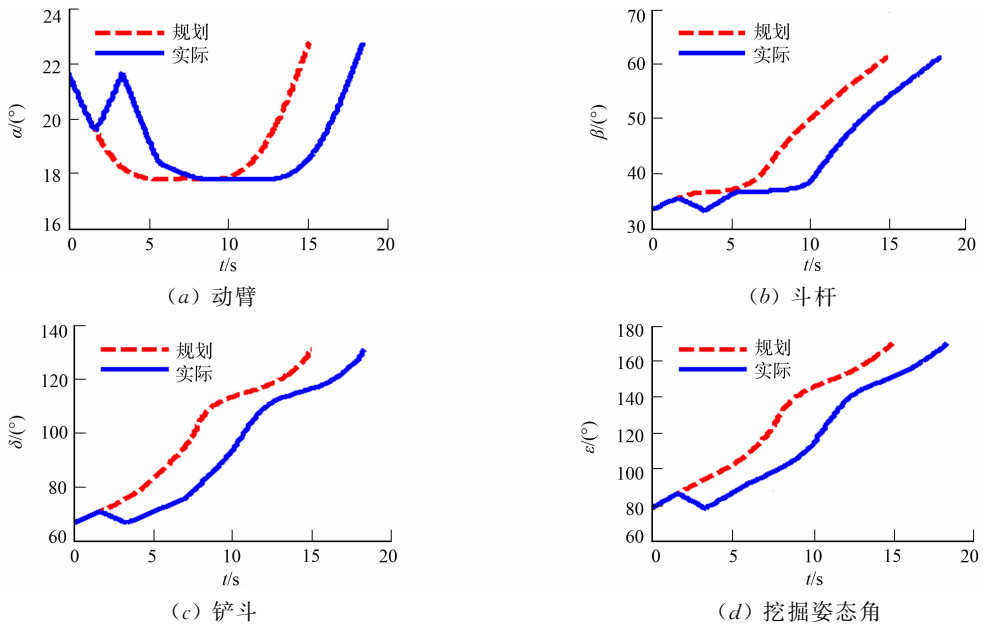
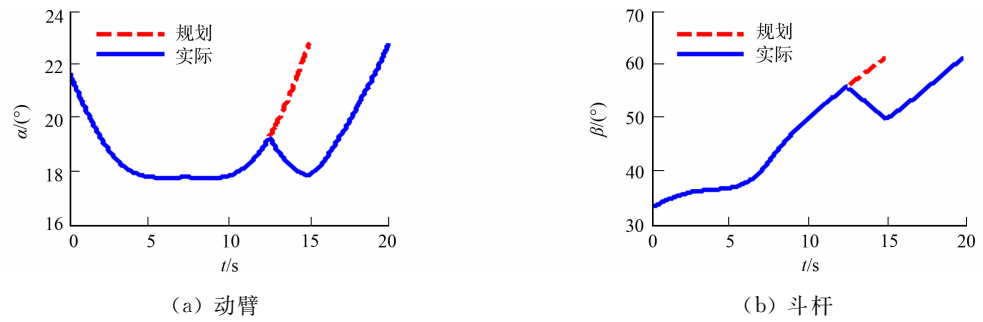


图 8 $\omega_3=2$ 时, 挖掘机器人各关节角度及挖掘姿态角变化曲线

Fig. 8 Joint angle and mining attitude angle curves of robotic excavator when $\omega_3=2$



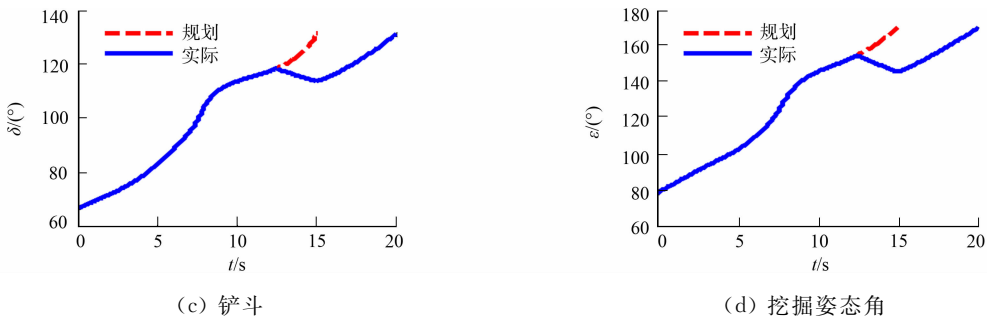


图 9 $\omega_8=4$ 时,挖掘机器人各关节角度及挖掘姿态角变化曲线

Fig. 9 Joint angle and mining attitude angle curves of robotic excavator when $\omega_8=4$

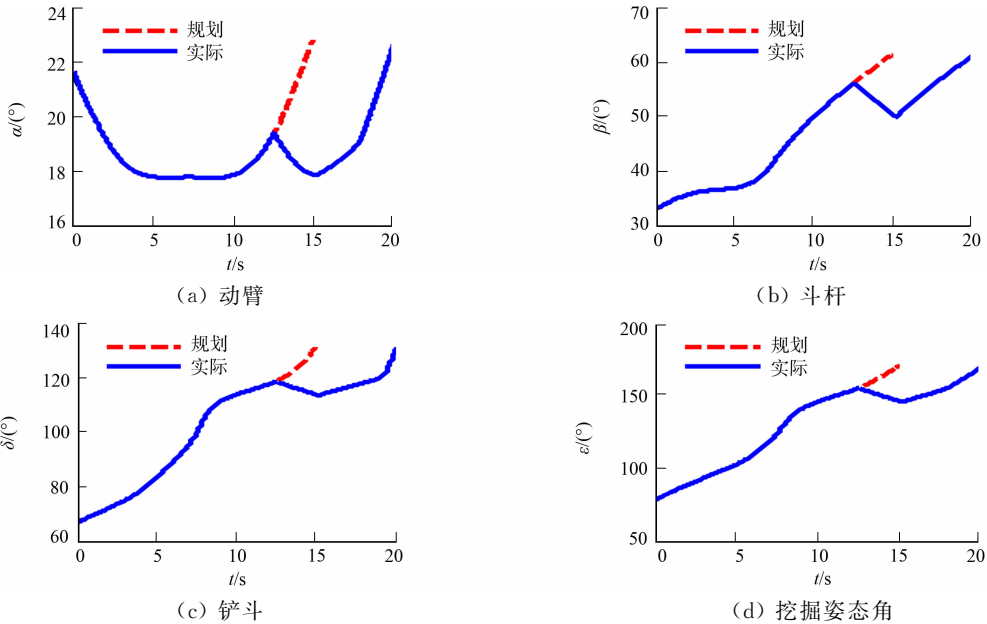


图 10 $\omega_7=2$ 时,挖掘机器人各关节角度及挖掘姿态角变化曲线

Fig. 10 Joint angle and mining attitude angle curves of robotic excavator when $\omega_7=2$

5 结束语

通过研究挖掘机器人的机械机构、工作特性,提出一种基于 3 次 NURBS 曲线的挖掘机器人轨迹规划方法. 在分析该轨迹规划方法理论的基础上,充分利用 NURBS 曲线具有局部修改性和 C^2 连续性的特性. 当铲斗与大障碍物发生碰撞时,运用原像规划算法判断修改权重因子,获得满足约束条件的自主避障挖掘轨迹,使挖掘机器人在整个运动过程中,各关节均可平稳且快速地经过规定的控制顶点,并可根据具体的实际工况,自动进行局部挖掘轨迹优化;同时,也验证该轨迹规划方法的有效性与可行性.

参考文献:

[1] 张海涛,何清华,张新海,等. 机器人液压挖掘机运动系统的建模与控制[J]. 机器人,2005,27(2):113-117. DOI:10.3321/j. issn:1002-0446. 2005. 02. 004.

[2] PEYRETA F,JURASZ J,CARREL A,*et al.* The computer integrated road construction project[J]. Automation in Construction,2000,9(5/6):447-761. DOI:10.1016/S0926-5805(00)00057-1.

[3] 杨毅,冯培恩,高宇. 挖掘机器人作业过程中局部自主避障控制[J]. 自动化学报,1999,25(5):655-661. DOI:10.16383/j. aas. 1999. 05. 012.

[4] SAEEDI P,LAWRENCE P D,LOWE D G,*et al.* An autonomous excavator with vision-based track-slippage control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2005,13(1):67-84. DOI:10.1109/TCST. 2004. 838551.

[5] 邵辉,叶贤成,孙祥云. 液压挖掘机的两级平滑挖掘规划方法研究[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(5):610-614. DOI:10.11830/ISSN. 1000-5013. 201605017.

- [6] 李海虹,林贞国.自主挖掘的平滑连续特性轨迹规划研究[J].中国工程机械学报,2016,14(2):93-98. DOI:10.15999/j.cnki.311926.2016.02.001.
- [7] KIM D,KIM J,LEE K,*et al.* Excavator tele-operation system using a human arm[J]. Automation in Construction, 2009,18(2):173-182. DOI:10.1016/j.autcon.2008.07.002.
- [8] LEE S U,CHANG P H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface[J]. Control Engineering Practice,2002,10(7):697-711. DOI:10.1016/S0967-0661(02)00027-8.
- [9] GU Jun,SEWARD D. Digital servo control of a robotic excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,22(2):190-197. DOI:10.3901/CJME.2009.02.190.
- [10] LIN C S,CHANG P R,LUH J Y S. Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,1983,28(12):1066-1073. DOI:10.1109/TAC.1983.1103181.
- [11] REYNOSO-MORA P,CHEN Wenjie,TOMIZUKA M. On the time-optimal trajectory planning and control of robotic manipulators along predefined paths[C]// American Control Conference. Washington DC:American Automatic Control Council,2013:371-377. DOI:10.1109/ACC.2013.6579865.
- [12] MACFARLANE S,CROFT E A. Jerk-bounded manipulator trajectory planning: Design for real-time applications [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation,2003,19(1):42-52. DOI:10.1109/TRA.2002.807548.
- [13] 陈刚,沈林成.复杂环境下路径规划问题的遗传路径规划方法[J].机器人,2001,23(1):40-55. DOI:10.3321/j.issn.1002-0446.2001.01.009.
- [14] 梁宏斌,王永章,李霞.自动调节进给速度的 NURBS 插补算法的研究与实现[J].计算机集成制造系统,2006,12(3):428-433. DOI:10.3969/j.issn.1006-5911.2006.03.018.
- [15] 王国勋,王宛山,王军,等.实时快速 NURBS 直接插补技术[J].中国机械工程,2013,24(5):617-622. DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.05.011.
- [16] 管成,王飞,张登雨.基于 NURBS 的挖掘机器人时间最优轨迹规划[J].吉林大学学报(工学版),2015,42(2):540-546. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb201502030.
- [17] 刘宇,刘春时,张义民.基于 NURBS 的挖掘机自主控制铲斗轨迹规划方法[J].中国工程机械学报,2012,10(2):145-149. DOI:10.3969/j.issn.1672-5581.2012.02.004.
- [18] 邵辉,胡伟石,罗继亮,等.自动挖掘机的动作规划[J].控制工程,2012,19(4):594-597.
- [19] 张大庆,何清华,郝鹏,等.液压挖掘机铲斗的轨迹跟踪控制[J].吉林大学学报(工学版),2005,35(5):490-494. DOI:10.3969/j.issn.1671-5497.2005.05.008.
- [20] 刘宇,戴丽,刘杰,等.泰勒展开 NURBS 曲线插补算法[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(1):117-120. DOI:10.3969/j.issn.1005-3026.2009.01.030.
- [21] 叶丽,谢明红.采用积累弦长法拟合 3 次 NURBS 曲线[J].华侨大学学报(自然科学版),2010,31(4):383-387. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2010.04.0383.

(编辑:李宝川 责任编辑:钱筠 英文审校:崔长彩)