

# 复杂空间曲面焊接机器人自动编程系统

姚宇, 张秋菊, 陈宵燕, 吕青, 焦露

(江南大学, 无锡, 214122)

**摘要:** 针对机器人在空间曲面焊接过程中需要保持焊接速度和焊炬位姿恒定的工艺要求, 提出了一种适用于复杂空间曲面焊接机器人的运动规划方法, 该方法采用 NURBS 曲线对三维点云描述的空间轨迹进行光顺逼近, 建立机器人配合变位机组成的多自由度焊接系统运动学模型并进行逆运动学求解. 开发了一套完整的复杂空间曲面焊接机器人自动编程系统. 以翻领成型器为例进行了复杂空间曲面焊接机器人的自动编程及焊接试验. 结果表明, 文中提出的复杂空间曲面焊接机器人运动规划方法和自动编程系统能够顺利完成焊接任务, 且运动平稳, 具有良好的焊接轨迹精度.

**创新点:** (1) 研究一种 NURBS 曲线光顺逼近算法, 兼顾焊接轨迹精度和系统运动平滑性.  
(2) 构建了适用于多自由度机械臂配合变位机的复杂空间曲面焊接运动学模型.  
(3) 设计了一套复杂空间曲面焊接机器人自动编程系统.

**关键词:** 空间曲面焊接; 焊接机器人; 自动编程系统; NURBS 曲线光顺

**中图分类号:** TG 409

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 12073/j. hjxb. 20220623003

## 0 序言

复杂空间曲面的自动化、高精度焊接技术对发展中国航天航空、国防军工以及工业生产等具有非常重要的作用<sup>[1-2]</sup>. 在现代化的工业场景中, 焊接机器人的应用越来越广泛. 由于复杂空间曲面的焊接编程十分复杂, 采用传统示教编程或手工编程存在效率低、精度差等问题, 难以满足实际应用需求. 因此, 复杂空间曲面焊接机器人的运动规划及编程对实现高效率、高精度焊接具有重要意义.

为了保证焊接质量, 机器人在空间曲面焊接过程中通常需要保持焊接速度和焊炬位姿恒定, 这给机器人的轨迹规划和编程带来了困难. 一般场景的轨迹规划主要考虑系统运动特征, 而针对焊接场景还需额外保证焊接速度和焊接位姿等焊接工艺需求. 郭吉昌等人<sup>[3]</sup>设计的新形箱型钢结构现场全位置焊接机器人基于实际焊接工艺需求对机器人求取逆运动学数值解实现了满足焊接工艺需要的轨迹规划, 但其主要针对于箱形钢的焊接. 曾锦乐等人<sup>[4]</sup>设计了一种三自由度平移台配合双自由度转

台的焊接机构, 根据焊接工艺要求运用运动学建模的方法, 提出了一种适用于复杂空间轨迹焊接的运动规划方法. 但该方法中焊炬姿态的调节并不灵活, 且并不适用于常见的多自由度机械臂配合旋转台变位机的机械构型.

在针对复杂空间作业任务编程方面, 机器人自动编程技术解决了传统的在线示教效率低、精度差等问题<sup>[5]</sup>, 其基于轨迹规划能很好地完成焊接机器人编程工作<sup>[6-8]</sup>. 因此, 目前自动编程在复杂空间曲面焊接等场景能够发挥了一定的作用. Shi 等人<sup>[9-10]</sup>提出了一种交叉管焊接的离线编程算法, 这种自动编程方法避免了烦琐的人工示教或自主编程造成的生产率瓶颈, 但其并不适用于复杂空间曲面的焊接. Bedaka 等人<sup>[11]</sup>开发了一个用于六自由度和二自由度机器人执行焊接任务的离线编程平台; Shen 等人<sup>[12]</sup>通过定义了 STEP 格式的焊接任务数据模型, 实现了现有 CAD 模型中信息不完全情况下更高的精度, 并支持机器人焊接系统的自动离线编程. 但上述研究在一定程度上依赖于现有商用离线编程软件或 CAD 软件的二次开发, 通常需要技术熟练的软件工程师进行系统维护, 并且使用方还需支付不低的软件费用<sup>[13]</sup>. 因此, 上述研究为

复杂空间曲面提供了一定的自动焊接基础,但是依旧难以满足实际生产需求。

针对复杂空间曲线的轨迹精确捕获问题,采用通用的三维点云文件作为焊接轨迹输入文件,引入 NURBS 曲线对三维点云描述的轨迹进行光顺逼近,相较于传统插值方法,可获得更光顺、更接近原始轨迹的曲线。文中综合考虑了在空间曲面焊接过程中对焊炬位姿、焊炬末端与焊接距离、焊接速度等的焊接工艺要求,构建了适用于机器人配合变位机组成的多自由度焊接系统的复杂空间曲面焊接运动学模型。在此基础上开发了一套适用于复杂空间曲面焊接的机器人自动编程系统。以包装机械中典型的曲面零件翻领成型器进行自动编程和焊接试验,验证了焊接自动编程系统的有效性和准确性。

## 1 空间轨迹的 NURBS 曲线光顺逼近

为获取焊接轨迹的完整信息,须先将描述焊接轨迹的离散点拟合合成曲线。使用直接插值拟合离散点得到的曲线难以满足光顺的要求,用该曲线直接控制焊接机器人系统容易造成焊接时关节冲击较大、焊接精度不高的问题<sup>[14]</sup>。运用 NURBS 曲线光顺逼近算法拟合焊接空间轨迹,能够在确保焊接轨迹不失真的前提下兼顾焊接机器人系统运动的平滑性以保证焊接过程中关节运动速度和加速度等参量的连续性,从而改善焊接质量。

### 1.1 NURBS 曲线简介

近年来,NURBS 曲线因具有诸多优点在计算机图形学领域获得了广泛的应用<sup>[15-17]</sup>。NURBS 曲线又称非均匀有理 B 样条曲线, $p$ 次 NURBS 曲线可表示为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,p}(u) P_i \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为控制点坐标向量; $w_i$ 为 $P_i$ 的权重因子, $R_{i,p}(u)$ 为 NURBS 曲线的基函数,写成表达式形式为

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u)w_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad (2)$$

式中: $N_{i,p}(u)$ 为 B 样条曲线基函数。

### 1.2 目标函数的构建

为了使拟合的焊接轨迹同时具有较高的逼近

精度和光顺度,可构造如下目标函数,即

$$f = \alpha \cdot f_1 + \beta \cdot f_2 \quad (3)$$

式中: $f_1$ 为光顺项; $f_2$ 为逼近项; $f_1, f_2$ 都是控制点  $P$  的函数,因此可以通过对目标函数求最小值的方式计算出控制点  $P$ ;系数  $\alpha, \beta$  分别为光顺项与逼近项的权重,实际运用时可根据实际情况给定。

### 1.3 光顺项 $f_1$ 和逼近项 $f_2$ 的构建

光顺项 $f_1$ 是用于控制曲线的光顺度,进而保障在进行焊接任务时机器人系统运动的平滑性。文中选取一种常见的方法,即该项采用二阶导数的平方和来限定离散点附近的曲率变化最小,进而达到整条曲线曲率变化均匀平缓,机器人焊接动作平滑的效果。 $f_1$ 具体形式如下,即

$$f_1 = \int_{k=0}^m \left\| \sum_{i=0}^n R''_{i,p}(u) P_i \right\|^2 du \quad (4)$$

式中: $m+1$ 为型值点的个数; $u$ 为对应型值点的参数。

逼近项 $f_2$ 是用于确保曲线具有较高的逼近精度,使曲线尽量靠近原始点从而确保拟合后焊接轨迹具有较高的精度。采用最小二乘法构造 $f_2$ ,具体形式为

$$f_2 = \sum_{k=1}^{m-1} \|C(u_k) - Q_k\|^2 \quad (5)$$

式中: $u_k$ 为型值点参数; $C(u_k)$ 为参数 $u_k$ 在曲线上对应的坐标向量; $Q_k$ 为给定型值点坐标向量,可由点云文件中点云信息得出。

### 1.4 最终轨迹的求解

将式(2)带入式(4)中,将式(1)、式(2)带入式(5),并将 $f_1, f_2$ 对 $P_l$  ( $l=1, \dots, n-1$ )求导,并令 $\frac{\partial f}{\partial P_l}$ 结果等于0,即 $\frac{\partial f_1}{\partial P_l} + \frac{\partial f_2}{\partial P_l} = 0$ 可得由以上诸式构成关于控制顶点坐标的线性方程组,然后用列主元 Gauss 消元法求解即可得到最佳的控制点序列,根据控制点及权重因子进而可以确定最终 NURBS 的光顺逼近轨迹为实际焊接轨迹。

## 2 复杂空间曲面焊接运动学建模

自行设计的复杂空间曲面焊接机器人焊接运动机构原理图如图1所示。焊炬安装在6自由度机械臂末端,待焊工件由工装夹具定位后固夹于单自

由度旋转台变位机上, 旋转台能够在水平面内转动, 且待焊翻领成型器中心轴和旋转台旋转轴重合. 在焊接过程中焊炬与焊接区的有向距离为  $h$ , 焊炬与焊接轨迹的切线方向夹角为  $\alpha$ .

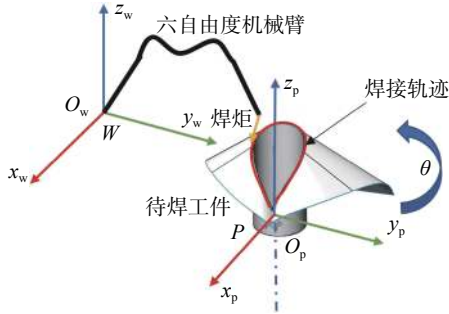


图 1 复杂空间曲面焊接机器人运动机构示意图

Fig. 1 Motion mechanism of complex space curved surface welding robot direction

建立与机械臂基坐标系完全重合的世界坐标系  $\{W\}$ ; 建立与旋转台固结的工件坐标系  $\{P\}$ , 工件坐标系的  $z$  轴与旋转台的回转中心重合, 且初始时刻工件坐标系  $\{P\}$  和世界坐标系  $\{W\}$  的  $x, y, z$  轴互相平行. 坐标建立情况示意图如图 2 所示.

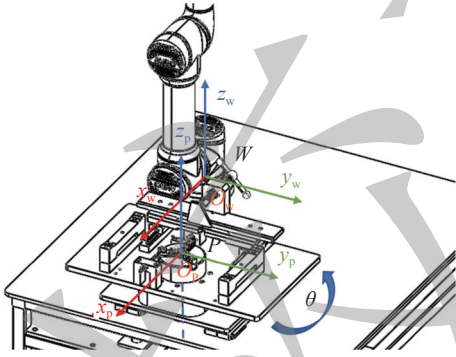


图 2 焊接机器人坐标系建立情况示意图

Fig. 2 Establishment of welding robot coordinate system direction

### 2.1 焊接姿态求解

$N_x$  和  $T_x$  分别表示焊点处的切向量和法向量. 通过导入待焊工件的三维点云文件, 调用 PCL 库中的 API 函数容易求得任意焊接点在工件坐标系  $\{P\}$  下法向量  $^P N_x$ , 利用上文获得的 NURBS 曲线焊接轨迹也容易求得对应焊接点工件坐标系  $\{P\}$  下切向量  $^P T_x$ , 则焊炬姿态的向量  $X_x$  在由  $N_x$  和  $T_x$  组成的平面内且应与  $T_x$  所夹的角为  $\alpha$ , 具体几何关系如图 3 所示. 焊炬的姿态向量  $X_x$  可由切向量  $T_x$  绕单位向量  $A$  顺时针旋转  $\alpha$  后得到, 单位向量  $A$  为切向量  $T_x$  和法向量  $N_x$  所在平面的单位向量, 故在工

件坐标系  $\{P\}$  中有

$$^P X_x = ^P T_x \cdot \cos(-\alpha) + (^P A \times ^P T_x) \cdot \sin(-\alpha) + ^P A \cdot (^P A \cdot ^P T_x) \cdot (1 - \cos(-\alpha)) \quad (6)$$

式中:  $^P A = ^P T_x \times ^P N_x$ ,  $^P A_x$  即为焊炬在工件坐标系  $\{P\}$  中的姿态向量.

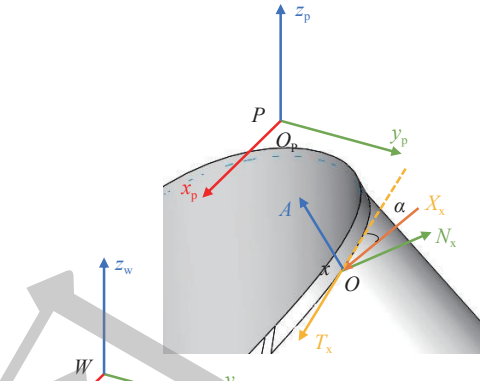


图 3 焊炬姿态求解示意图

Fig. 3 Welding torch attitude solution direction

### 2.2 机械臂末端位姿求解

每一个时刻对应一个焊接点, 设在  $t$  时刻, 旋转工作台的旋转角度为  $\theta$ ,  $t$  时刻对应的焊接点初始时刻在工件坐标系  $\{P\}$  中的位姿为  $^P T_x$ , 其中姿态矩阵可由上文中焊接姿态求解过程得到.  $t$  时刻工件坐标系与初始时刻工件坐标系的旋转变换矩阵为  $^W R_P(\theta)$ , 则有  $t$  时刻焊接点实际在世界坐标系  $\{W\}$  中的位姿  $^W T_X$  为

$$^W T_X(t) = ^W T_P \times ^P T_X \quad (7)$$

式中: 工具坐标系相对于世界坐标系的平移变换矩阵为  $^W P_P$ ,  $^W T_P = \begin{bmatrix} ^W R_P(\theta) & ^W P_P \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ .

设机械臂末端坐标系为  $\{E\}$ , 焊炬末端坐标系为  $\{T\}$ , 焊接加工过程  $t$  时刻机械臂末端在世界坐标系下的位姿为  $^W T_E$ , 通过机器人工具坐标系标定获得的焊炬末端坐标系与机械臂末端工具坐标系的变换矩阵为  $^E T_T$ , 则有

$$^W T_X(t) = ^W T_E \times ^E T_T \times ^T T_X \quad (8)$$

式中:  $^T T_X = \begin{bmatrix} I & H \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & h \end{bmatrix}^T$ ,  $I$  为单位矩阵.

联立式 (7)、式 (8), 即可求出执行焊接任务时机械臂末端的在世界坐标系  $\{W\}$  中的位姿  $^W T_E$ .



## 2.3 焊接轨迹规划

### 2.3.1 焊接速度控制

焊炬与机械臂末端是刚性连接,故  $t$  时刻焊炬末端在世界坐标系  $\{W\}$  下的瞬时速度  $v_1$  为

$$v_1 = \frac{d^W P_X}{dt} = \frac{d^W P_E}{dt} \quad (9)$$

式中:  ${}^W P_X$  表示焊接点在世界坐标系下的坐标;  ${}^W P_E$  表示机械臂末端在世界坐标系下的坐标。

根据式 (7) 可求得  $t$  时刻焊接点在世界坐标系  $\{W\}$  下的瞬时速度  $v_2$  为

$$v_2 = \frac{d^W R_P(\theta)}{dt} \quad (10)$$

实际焊接速度应为焊炬末端在世界坐标系  $\{W\}$  下的瞬时速度  $v_1$  与焊接点在世界坐标系  $\{W\}$  下的瞬时速度  $v_2$  的矢量之差,联立式 (9)、式 (10),得  $t$  时刻的焊接瞬时速度  $v$  为

$$v = v_1 - v_2 = \frac{d^W P_E}{dt} - \frac{d^W R_P(\theta)}{dt} \quad (11)$$

为保证焊接质量,需尽可能控制焊接速度与相应的焊接工艺参数匹配,即焊接速度的  $v$  的模等于常数  $C$ ,常数  $C$  是根据焊接工艺参数确定。

### 2.3.2 焊接路径规划

焊接理论路径即为 NURBS 曲线光顺逼近算法提取焊接路径。实际焊接时还需在满足各关节物理限制的前提下确认焊接速度达到要求。考虑到实际焊接过程中还需考虑各个关节的加速度、速度限制以兼顾运动平顺性以及实际轨迹控制精度,允许焊接速度有一定范围内的误差,即

$$\varepsilon \leq \left\| \frac{d^W P_E}{dt} - \frac{d^W R_P(\theta)}{dt} \right\| - C \quad (12)$$

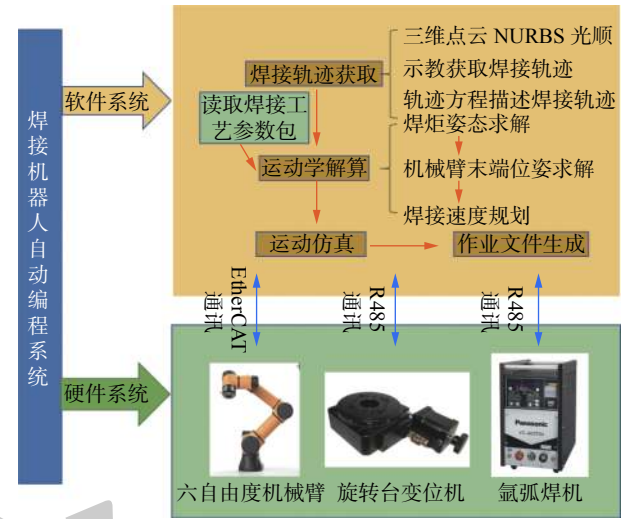
式中:  $\varepsilon$  为允许的最大焊接速度误差。

对于不满足式 (12) 的连续轨迹,实际焊接过程采用分段焊接的策略即可,至此完成了焊接的路径规划。

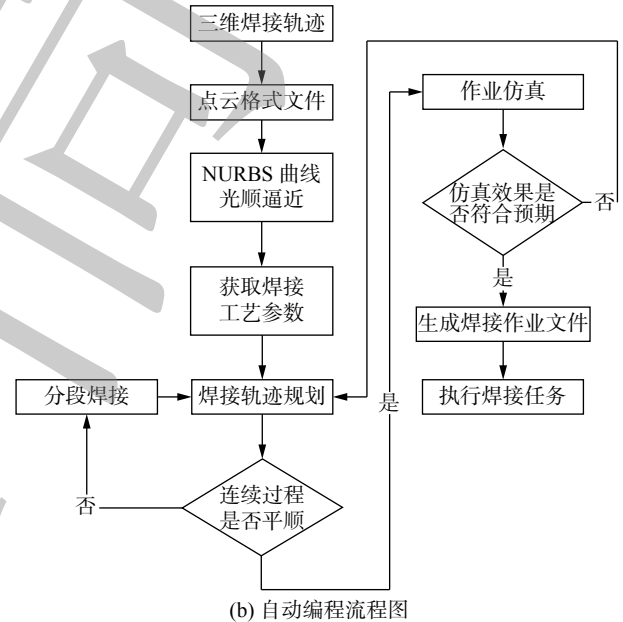
## 3 焊接机器人自动编程系统

文中设计的焊接机器人自动编程系统架构如图 4a 所示,其中软件主要包括以下功能模块:焊接轨迹获取、读取焊接工艺参数包、运动学解算、运动仿真、作业文件生成等功能模块。焊接轨迹获取除支持三维点云 NUBBS 光顺外,还支持示教和轨迹方程获取。系统进行自动编程的具体流程如图 4b

所示。



(a) 自动编程系统架构



(b) 自动编程流程图

图 4 焊接机器人自动编程系统

Fig. 4 Automatic programming system for welding robot. (a) Automatic programming system architecture; (b) Automatic programming flowchart

焊接轨迹一般为待焊工件的两个部分的相交线,在三维图中多表现为面的交线。具体自动编程流程如下:根据待焊件的三维设计图,选择导出焊接轨迹所在的线条,并另存为三维点云格式的文件<sup>[18]</sup>。其中 PLY 格式三维点云文件中的内容如图 5 所示,其中从第 11 行开始为数据信息,每一行的三个数据分别表示该点对应的三维坐标值。软件系统通过读取焊接轨迹上的所有点并对其进行 NURBS 曲线光顺逼近获得焊接轨迹,最终通过焊接位姿求解、焊接路径规划和速度规划等过程生成系统可识别的焊接作业文件。自动编程系统界面如

图 6 所示, 作业文件可直接在自动编程系统中进行仿真验证, 确认无误后可由软件系统直接通过 EtherCAT 通信、RS485 通信传输分别控制机械臂和旋转台相互配合完成焊接任务。

```
ply
format ascii 1.0
comment File exported by Rhinoceros Version 7.0
element vertex 104656
property float x
property float y
property float z
element face 118764
property list uchar uint vertex_indices
end_header
-44.9831008911133 1.1754515171051 50.8199081420898
-44.9376411437988 2.36944007873535 53.4884414672852
-44.8563690185547 3.58490014076233 56.1464462280273
-44.7407341003418 4.81928730010986 58.7944107055664
-44.5878791809082 6.07283163070679 61.4314346313477
-44.3960380554199 7.34489631652832 64.0570907592773
```

图 5 PLY 文件数据

Fig. 5 PLY file data



3D 图形化仿真

图 6 焊接机器人离线编程系统软件界面

Fig. 6 Software interface of welding robot offline programming system

## 4 试验验证

翻领成型器是袋装机械中最常用的制袋成型器, 是立式制袋-充填-封口机上的核心部件<sup>[19]</sup>, 对包装袋的成型质量、效率都有较大的影响<sup>[20]</sup>。翻领成型器的焊接是复杂空间曲面焊接的典型应用场景之一, 故以焊接某翻领成型器为实例进行试验验证。焊接系统采用自主设计的旋转工作台变位机和工装夹具、遨博 AUBO-i5 六自由度机器人和松下 YC-400TX4HGT 水冷焊机, 系统的实物图如图 7 所示。

### 4.1 自动编程系统试验验证

试验一: 对如图 8 所示的翻领成型器样件进行

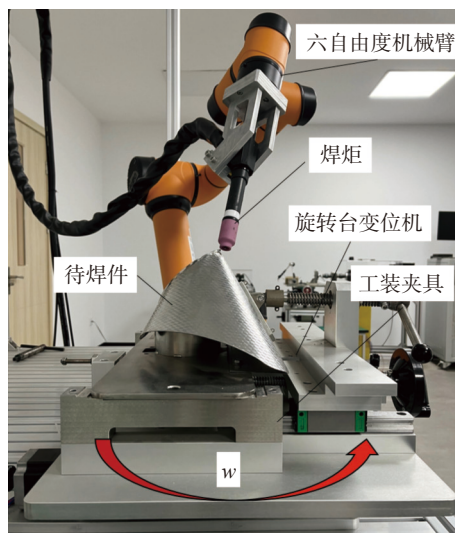


图 7 复杂空间曲面焊接机器人系统实物图

Fig. 7 Physical drawing of complex space curved surface welding robot system

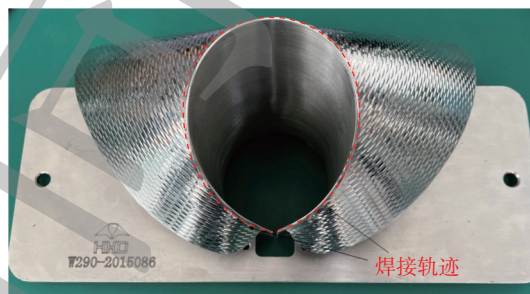


图 8 待焊翻领成型器样件

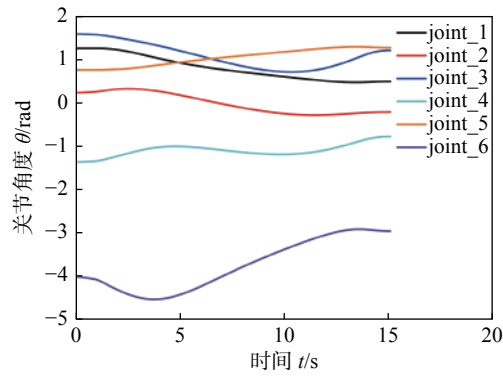
Fig. 8 Lapel shaper sample to be welded

自动编程焊接试验。在软件系统中导入该样件的三维点云图和三维点云焊接轨迹, 但在轨迹拟合时采用插值拟合而暂不采用 NURBS 曲线光顺逼近, 生成该焊接的焊接作业文件并利用系统进行 3D 图形化仿真, 验证无误后进行实际轨迹的执行。其中自动编程并生成作业文件过程仅用时 6.82 s, 相较传统示教和手动编程效率有了极大提高。在实际轨迹执行时监测机械臂各个关节的实时角度和电流以及实际焊炬末端的位置。

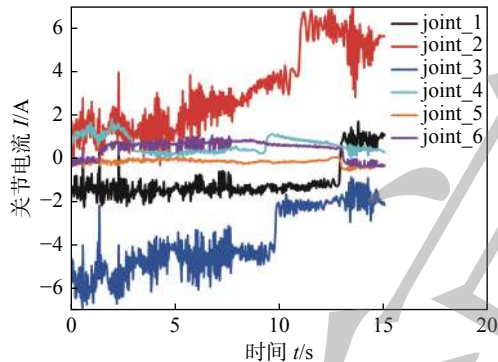
具体试验工艺参数如图 9 所示, 通过观测对比焊炬末端的实际位置和预期待焊点的空间关系, 可有效验证焊接机器人自动编程系统设计的正确性和可靠性。轨迹在无 NURBS 曲线光顺时, 在保证焊接姿态的前提下, 焊枪末端最大误差为  $\pm 0.56$  mm, 佐证了自动编程系统的正确性。

### 4.2 焊接轨迹 NURBS 曲线光顺逼近有效性验证

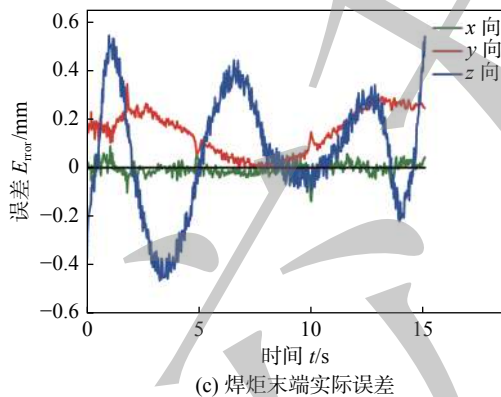
试验二: 同试验一对如图 8 所示的翻领成型器样件进行自动编程焊接试验。不同的是在轨迹拟合



(a) 关节角度随时间变化图



(b) 关节电流随时间变化图



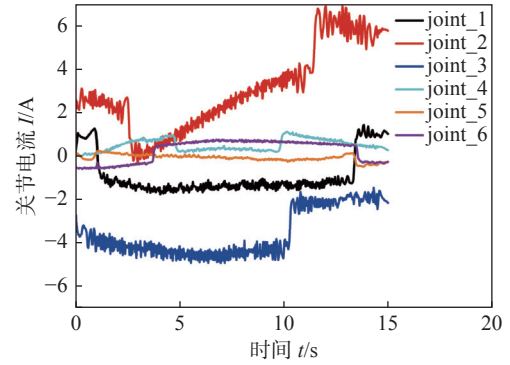
(c) 焊炬末端实际误差

图9 无NURBS光顺自动编程焊接试验系统参数

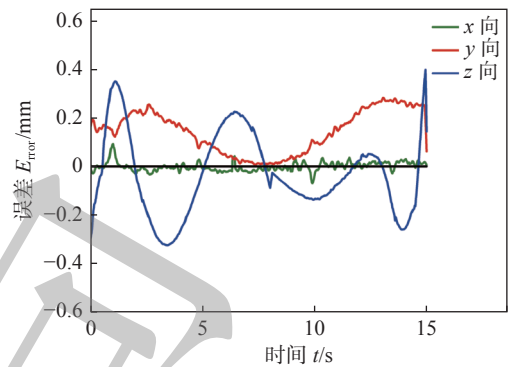
Fig. 9 No NURBS smoothing automatic programming welding experimental system parameters. (a) graph of joint angle with time; (b) graph of joint current with time; (c) actual error at the end of the welding torch

时采用文中提出的NURBS曲线光顺逼近,与试验一形成对照.在实际轨迹执行时监测机械臂各个关节的速度和电流以及实际焊炬末端的位置,得到的试验参数如图10所示.

使用NURBS曲线光顺时,在保证焊接姿态的前提下,焊枪末端最大误差为 $\pm 0.41$  mm.通过对比试验一和试验二的焊炬末端的实际误差和关节电流随时间变化图,可表明轨迹NURBS曲线光顺逼近能够在一定程度上缓和机械臂的关节运动冲击并提高焊接精度.相比试验一,试验二中的焊炬末



(a) 关节电流随时间变化图



(b) 焊炬末端实际误差

图10 NURBS光顺自动编程焊接试验系统参数

Fig. 10 NURBS smoothing automatic programming welding experimental system parameters. (a) graph of joint current with time; (b) actual error at the end of the welding torch

端误差相对稳定,为后续引入立体视觉进行焊缝跟踪创造了有利条件.

## 5 结论

(1) 建立机器人配合变位机组成的多自由度焊接系统运动学模型,通过对模型进行逆运动学求解机械臂和变位机的位姿,完成了多自由度焊接系统的运动学控制;通过在运动学模型中添加的焊炬位姿和焊接速度约束,确保了在焊接复杂空间曲面时焊接速度和焊炬位姿恒定的焊接工艺要求.

(2) 自主搭建了一套完整的焊接机器人自动编程系统,实现了读入待焊工件三维点云文件自动化编程生成焊接系统作业文件的功能,有效提高了复杂空间曲面焊接的编程效率,降低了操作门槛.

(3) 针对轨迹插值拟合可能存在的曲线曲率变化较大而造成机械臂运动时关节冲击较大的问题,引入NURBS曲线光顺逼近拟合轨迹,通过合理调配目标函数中光顺项和逼近项的系数确保轨迹不失真的前提下兼顾焊接机器人系统运动的平



滑性, 缓和关节冲击。

## 参考文献

- [1] 杨建华, 张定华, 吴宝海. 考虑加工过程的复杂薄壁件加工综合误差补偿方法 [J]. *航空学报*, 2014, 35(11): 3174 – 3181.  
Yang Jianhua, Zhang Dinghua, Wu Baohai. A comprehensive error compensation approach considering machining process for complex thinwall parts machining[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2014, 35(11): 3174 – 3181.
- [2] Feng J, Zhang H, Peng H. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets welding[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(5): 1850 – 1852.
- [3] 郭吉昌, 朱志明, 王鑫, 等. 全位置焊接机器人逆运动学数值求解及轨迹规划方法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(3): 292 – 297.  
Guo Jichang, Zhu Zhiming, Wang xin, *et al.* Numerical solution of the inverse kinematics and trajectory planning for an all-position welding robot[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2018, 58(3): 292 – 297.
- [4] 曾锦乐, 都东, 常保华, 等. 复杂空间轨迹焊接过程运动规划方法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2016, 56(10): 1031 – 1036.  
Zeng Jinle, Du Dong, Chang Baohua, *et al.* Motion planning method for complex three dimensional path welding[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2016, 56(10): 1031 – 1036.
- [5] 马凯威, 韩良, 孙小肖, 等. 基于曲率优化的机器人砂带磨削轨迹规划 [J]. *机器人*, 2018, 40(3): 360 – 367.  
Ma Kaiwei, Han Liang, Sun Xiaoxiao, *et al.* Trajectory planning for robotic belt grinding based on curvature optimization[J]. *Robot*, 2018, 40(3): 360 – 367.
- [6] Yang L, Liu Y H, Peng J Z. Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review[J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110: 1027 – 1046.
- [7] 孙瑜, 郑祖杰, 圣冬冬, 等. 航天大型复杂结构件数控加工编程技术发展现状与趋势 [J]. *工具技术*, 2021, 55(6): 13 – 17.  
Sun Yu, Zheng Zujie, Sheng Dongdong, *et al.* Development status and trend of NC machining programming technology for aerospace large-scale complex structural parts[J]. *Tool Engineering*, 2021, 55(6): 13 – 17.
- [8] Wang B, Hu S J, Sun L, *et al.* Intelligent welding system technologies: state-of-the-art review and perspectives[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 56: 373 – 391.
- [9] Shi L, Tian X. Automation of main pipe-rotating welding scheme for intersecting pipes[J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(5-8): 955 – 964.
- [10] Shi L, Tian X, Zhang C. Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes[J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9-12): 2099 – 2107.
- [11] Bedaka A K, Lin C Y. CAD-based offline programming platform for welding applications using 6-DOF and 2-DOF robots[C]//2020 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS), 2020.
- [12] Shen W, Hu T, Zhang C, *et al.* A welding task data model for intelligent process planning of robotic welding[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 64: 101934.
- [13] Zheng C, An Y, Wang Z, *et al.* Hybrid offline programming method for robotic welding systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022, 73: 102238.
- [14] Ribeiro J, Rui L, Eckhardt T, *et al.* Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0 – a literature review[J]. *Procedia Computer Science*, 2021, 181(1): 51 – 58.
- [15] 方建文, 晁永生, 袁逸萍. 改进 B 样条插值法的焊接机器人关节轨迹优化 [J]. *机械设计与制造*, 2021, 368(10): 1 – 4, 10.  
Fang Jianwen, Chao Yongsheng, Yuan Yiping. Research on the trajectory optimization of welding robot based on improved B-Spline interpolation method[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2021, 368(10): 1 – 4, 10.
- [16] Hashemian A, Hosseini S F. An integrated fitting and fairing approach for object reconstruction using smooth NURBS curves and surfaces[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2018, 76(3): 1555 – 1575.
- [17] 兰浩, 李德信. NURBS 曲线整体光顺逼近算法研究 [J]. *计算机应用*, 2018, 76(3): 1555 – 1575.  
Lan Hao, Li Dexin. Research of whole fairing and approximation algorithm of NURBS curve[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 76(3): 1555 – 1575.
- [18] 王天琪, 李天旭, 李亮玉, 等. 复杂结构薄壁件电弧增材制造离线编程技术 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(5): 42 – 47.  
Wang Tianqi, Li Tianxu, Li Liangyu, *et al.* Off-line programming technology for arc additive manufacturing of thin-walled components with complex structures[J]. *Transactions of the china welding institution*, 2019, 40(5): 42 – 47.
- [19] 杨永亮, 周一届. 无背平面式翻领成型器研究与应用 [J]. *机械设计*, 2015, 32(6): 79 – 82.  
Yang Yongliang, Zhou Yijie. Study and application of shoulder former without back plane[J]. *Journal of Machine Design*, 2015, 32(6): 79 – 82.
- [20] 罗孟军. 翻领制袋成型器制袋过程分析 [D]. 无锡: 江南大学, 2014.  
Luo Mengjun. Analysis about Bag-making process of the forming shoulder[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.

第一作者: 姚宇, 硕士研究生; 主要从事焊接机器人智能控制技术以及焊接机器人自动编程方面研究; Email: 6200810113@stu.jiangnan.edu.cn.  
通信作者: 张秋菊, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: qjzhang@jiangnan.edu.cn.

(编辑: 王娇)