

本文引用格式: 徐群华, 林群煦, 张弓, 等. 多机器人空间轨迹规划与运动学特性研究[J]. 自动化与信息工程, 2022, 43(1): 15-19, 32.
XU Qunhua, LIN Qunxu, ZHANG Gong, et al. Research on spatial trajectory planning and dynamic characteristics of multi-robot[J]. Automation & Information Engineering, 2022, 43(1): 15-19, 32.

多机器人空间轨迹规划与运动学特性研究*

徐群华^{1,2} 林群煦¹ 张弓^{2,3} 吴月玉² 杨根² 张雨航² 刘梦迪²

(1. 五邑大学轨道交通学院, 广东 江门 529000

2. 广州先进技术研究, 广东 广州 511458 3. 中国科学院大学, 北京 100086)

摘要: 多机器人系统相较于单机器人系统具有更高的工作效率、更大的工作空间、更灵活的作业方式, 能完成更复杂的工作任务。针对多机器人协同焊接系统, 研究采用双机器人和三机器人完成螺旋轨迹时, 各机器人的关节运动学特性。仿真结果表明: 三机器人完成螺旋轨迹时间比双机器人短, 且关节运动量减少; 验证本文建立模型的正确性, 为后续研究提供理论依据。

关键词: 多机器人系统; 轨迹规划; 运动学特性

中图分类号: TG156

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)01-0003-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.01.003

0 引言

多机器人系统凭借良好的环境适应性, 高效率、高生产质量, 广泛用于焊接、喷涂、码垛、搬运等场景^[1]。机器人与焊接技术的协同配合, 使焊接产品的质量与焊接效率得到显著提高, 成为目前的研究热点。轨迹规划作为机器人的重要研究领域, 其优劣直接影响焊接产品质量。为此, 国内外学者在多机器人焊接轨迹规划方面进行大量研究。针对多机器人之间的协作关系, 文献[2-4]提出多机器人协同作业的本质是约束, 基于主从式多机器人协作系统, 提出面向被操作对象“分层规划”的多机器人规划方法。针对多机器人轨迹规划, 文献[5]提出基于闭环运动链模型的多机器人协同轨迹规划方法, 建立多机器人焊接工作站的通用闭环运动链, 通过运动学仿真, 验证该方法的有效性 & 可行性; 文献[6-7]针对飞机双曲面板双光束激光焊接中多机器人协同轨迹规划问题, 建立多机器人运动学模型, 提出基于粒子群算法对三样条插值时间点进行优化的轨迹规划方法; 文献[8-9]提出面向任务的多机器人轨迹协调方法, 并建立面向工件的协作通用公式。

上述研究未对多机器人完成复杂轨迹时, 机器人

各关节的运动学特性进行分析。为此, 本文以多机器人焊接为研究背景, 建立三机器人协同焊接系统, 通过仿真完成螺旋轨迹, 并分析系统中各机器人的关节运动学特性, 为后续实验提供理论数据, 保障实验人员安全。

1 三机器人协同焊接系统结构建模

本文采用 3 台六关节机器人组成三机器人协同焊接系统, 包括 2 台搬运机器人 CA 50N、CA 20N 和 1 台装有焊枪的 IRB 1410 焊接机器人, 如图 1 所示。

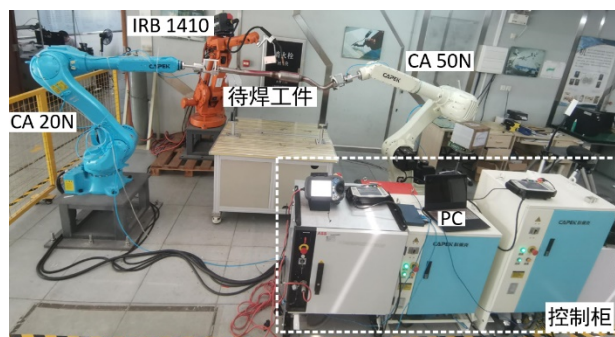


图 1 三机器人协同焊接系统

通过建立与实验环境相匹配的仿真环境进行仿真。首先, 将机器人三维模型导入 v-rep 仿真软件;

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(62073092); 广东省自然科学基金项目(2021A1515012638); 广州市基础研究计划(202002030320); 云浮市科技计划项目(2021020401)。

然后，建立三机器人协同焊接系统相对坐标；最后，对待焊工件相对于世界坐标系的变换矩阵进行求解。

建立三机器人协同焊接系统相对坐标系：

- 1) 设置世界坐标系；
- 2) 设置各机器人基坐标系、关节末端坐标系以及机器人手部坐标系；
- 3) 确定待焊工件坐标系，如图 2 所示。

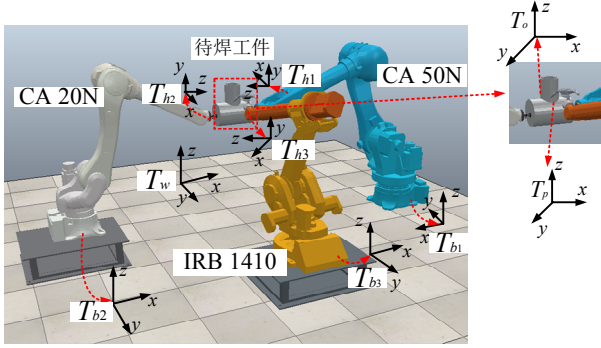


图 2 三机器人协同焊接系统相对坐标系

对于主从多机器人协作系统，可依据主从机器人手部之间的位姿关系是否变化，分为紧耦合和松耦合主从式协作方式。其中紧耦合主从式协作方式是指在作业过程中，从机器人相对于主机器人手部的相对位姿不变；松耦合主从式协作方式是指在作业过程中，从机器人相对于主机器人手部的相对位姿是时变的^[2]。

在三机器人协同焊接系统中，由于 2 台搬运机器人搬运 1 个刚体，所以不存在相对运动，可将任意 1 台机器人作为主机器人，本文将搬运机器人 CA 20N 设为主机器人。2 台搬运机器人 CA 20N、CA 50N 之间为紧耦合主从式协作，则搬运机器人之间坐标系的齐次变换为

$$\mathbf{T}_{h2}^{b2} = \mathbf{T}_{b1}^{b2} \mathbf{T}_{h1}^{b1} \mathbf{T}_{h2}^{h1} \quad (1)$$

式中：

$\mathbf{T}_{h2}^{b2}$ ——CA 20N 手部坐标系相对于基坐标系的位姿变换矩阵；

$\mathbf{T}_{h1}^{b1}$ ——CA 50N 手部坐标系相对于基坐标系的位姿变换矩阵；

$\mathbf{T}_{b1}^{b2}$ ——CA 50N 基坐标系相对于 CA 20N 基坐标系的位姿变换矩阵；

$\mathbf{T}_{h2}^{h1}$ ——CA 50N 手部坐标系相对于 CA 20N 手部坐标系的位姿变换矩阵。

因为双搬运机器人协作系统为紧耦合主从协作方式，公式(1)中 $\mathbf{T}_{h2}^{h1}$ 和 $\mathbf{T}_{b1}^{b2}$ 是固定的，所以可根据主机器人的轨迹求得从机器人的轨迹。

三机器人协同焊接系统中，搬运机器人与焊接机器人为松耦合主从协作方式，搬运机器人 CA 20N 与焊接机器人 IRB 1410 之间的坐标系变换关系为

$$\mathbf{T}_{h3}^{b3} = \mathbf{T}_{b1}^{b3} \mathbf{T}_{h1}^{b1} \mathbf{T}_{h3}^{h1} \quad (2)$$

式中：

$\mathbf{T}_{h3}^{b3}$ ——IRB 1410 手部坐标系相对于基坐标系的位姿变换矩阵；

$\mathbf{T}_{h1}^{b1}$ ——CA 50N 手部坐标系相对于基坐标系的位姿变换矩阵；

$\mathbf{T}_{b1}^{b3}$ ——CA 50N 基坐标系相对于 IRB 1410 的位姿变换矩阵；

$\mathbf{T}_{h3}^{h1}$ ——IRB 1410 手部坐标系相对于 CA 50N 手部坐标系的位姿变换矩阵。

因为搬运机器人 CA 20N 与焊接机器人 IRB 1410 为松耦合主从协作方式，公式(2)中 $\mathbf{T}_{b1}^{b3}$ 和 $\mathbf{T}_{h1}^{b1}$ 是已知的，所以由矩阵 $\mathbf{T}_{h3}^{h1}$ 可得到焊接机器人 IRB 1410 的轨迹。

2 复杂轨迹数学建模

在复杂焊缝轨迹规划前，需以一定的插补周期 T 对焊缝轨迹进行离散化，得到一系列焊缝离散点 D_i ，如图 3 所示。假设工件的坐标系为 $\{O\}$ ，焊缝路径点坐标为 $\{P_i\}$ ，则需求得焊缝路径参考点在 $\{O\}$ 中的位姿变换矩阵。

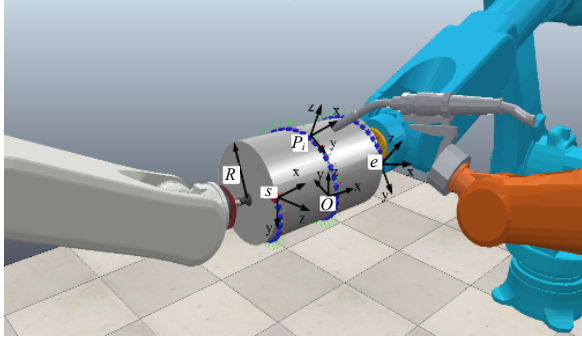


图3 螺旋曲线离散化

设曲线起点为 s , 终点为 e , 方向为 s 至 e , 焊接速度为 V_i , 插补周期为 T_s , 根据上一点 D_i 求下一点 D_{i+1} 的位置, 曲线焊缝点的离散坐标系 $\{P_i\}$ 位置的三角函数表达式为

$$\begin{cases} x_i = p_x(\theta_i) \\ y_i = p_y(\theta_i) \\ z_i = p_z(\theta_i) \end{cases} \quad (3)$$

其函数表达式的弧长公式为

$$S(\theta_i) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_i} \sqrt{(p'_x(\theta_i))^2 + (p'_y(\theta_i))^2 + (p'_z(\theta_i))^2} d\theta \quad (4)$$

弧微分公式为

$$ds(\theta) = \sqrt{(p'_x(\theta_i))^2 + (p'_y(\theta_i))^2 + (p'_z(\theta_i))^2} d\theta \quad (5)$$

$$V_0 = \frac{ds(\theta)}{dt} = \frac{ds(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{ds(\theta)}{d\theta} \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = V_0 / \frac{ds(\theta)}{d\theta} = \frac{V_0}{\sqrt{(p'_x(\theta_i))^2 + (p'_y(\theta_i))^2 + (p'_z(\theta_i))^2}} \quad (7)$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta_i = \theta_i + \dot{\theta}_i T_s = \theta_i + \frac{V_0 T_s}{\sqrt{(p'_x(\theta_i))^2 + (p'_y(\theta_i))^2 + (p'_z(\theta_i))^2}} \quad (8)$$

整理公式, 可得到空间曲线焊缝离散点在坐标系 $\{P_i\}$ 的位置坐标为

$$p_i = [p_x(\theta_i) \quad p_y(\theta_i) \quad p_z(\theta_i)]$$

设空间曲线的方程为

$$\begin{cases} F_1(x, y, z) = 0 \\ F_2(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

焊缝点 $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ 处的切向量为

$$V(P_i) = [p'_x(\theta_i) \quad p'_y(\theta_i) \quad p'_z(\theta_i)]$$

焊件表面的法向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_1 = \pm \left(\frac{\partial F_1}{\partial x} \quad \frac{\partial F_1}{\partial y} \quad \frac{\partial F_1}{\partial z} \right) \\ \mathbf{n}_2 = \pm \left(\frac{\partial F_2}{\partial x} \quad \frac{\partial F_2}{\partial y} \quad \frac{\partial F_2}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (10)$$

由焊缝点离散坐标系 $\{P_i\}$ 的 Z 轴方向:

$$\mathbf{m}(P_i) = \frac{\mathbf{n}_1(P_i)}{\|\mathbf{n}_1(P_i)\|} + \frac{\mathbf{n}_2(P_i)}{\|\mathbf{n}_2(P_i)\|} \quad (11)$$

焊缝离散点坐标系 $\{P_i\}$ 的 X 轴单位向量:

$$\mathbf{u} = \frac{V(P_i)}{\|V(P_i)\|} = (u_x, u_y, u_z) \quad (12)$$

焊缝离散点坐标系 $\{P_i\}$ 的 Z 轴单位向量:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{m}(P_i)}{\|\mathbf{m}(P_i)\|} = (w_x, w_y, w_z) \quad (13)$$

焊缝离散点坐标系 $\{P_i\}$ 的 Y 轴单位向量:

$$\mathbf{v} = \mathbf{w} \times \mathbf{u} = (v_x, v_y, v_z) \quad (14)$$

得到焊缝离散点坐标系 $\{P_i\}$ 在工件坐标系 $\{O\}$ 下的位姿矩阵为

$$\mathbf{T}_{P_i}^O = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x(\theta_i) \\ u_y & v_y & w_y & p_y(\theta_i) \\ u_z & v_z & w_z & p_z(\theta_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3 仿真分析

利用机器人仿真模拟软件 v-rep 进行仿真。首先, 将机器人三维模型导入 v-rep 仿真软件, 确定机器人

位置,设置关节碰撞属性,采取PID控制模式;然后,将离散后的焊缝轨迹导入v-rep与工件附着,在轨迹上取target点,并设置其速度及加速度;最后,在焊接机器人末端选取tip点,并跟随target运动,完成螺旋线和相贯线的轨迹规划。限于篇幅,且CA 50N与CA 20N运动情况相同,故本文仅对CA 20N的运动学参数进行分析。

1) 采用双机器人

螺旋曲线是空间曲线,采用单机机器人难以完成,至少需要2台机器人通过旋转和平移,完成螺旋曲线的轨迹规划。CA 20N关节位置、速度、加速度曲线如图4所示。

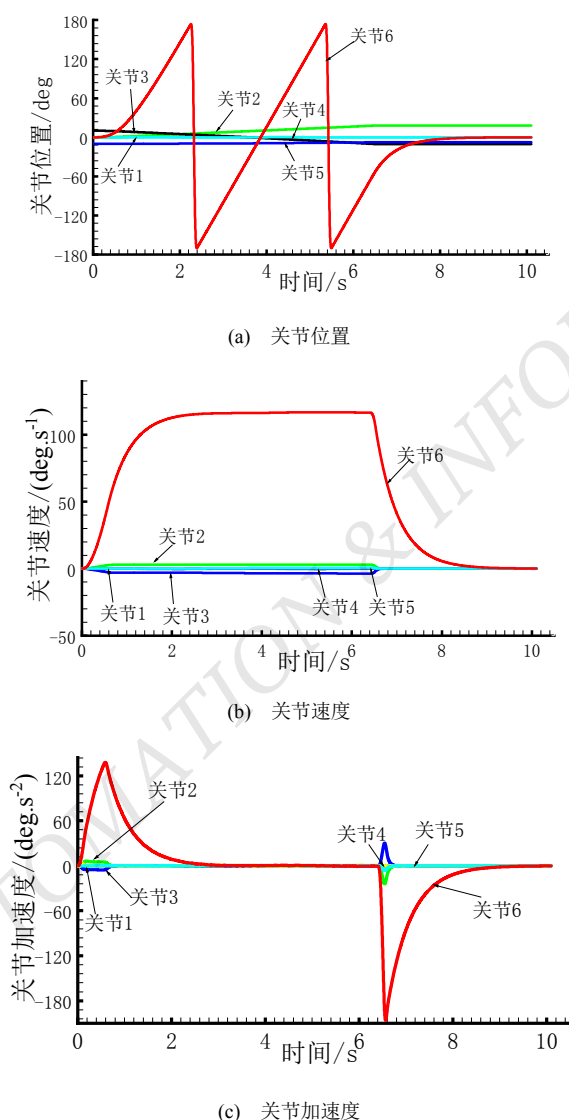


图4 CA 20N 关节位置、速度、加速度曲线(双机器人)

由图4(a)可以看出,CA 20N 关节6的转动量最大,经查该机器人运动范围参数为 $(-360, 360)$,其值远大于仿真中关节6的转动量,因此,其旋转角度符合实际情况。

由图4(c)可以看出,CA 20N 关节6在动作开始和结束时,关节加速度变化较大,角速度瞬时变化过快,力矩较大。因此,需降低CA 20N 速度百分比,以减少力矩突变和关节受损。

2) 采用三机器人

采用三机器人完成螺旋曲线规划,其中2台搬运机器人提供位姿变换,1台焊接机器人进行平移。IRB 1410和CA 20N 关节位置、速度、加速度曲线如图5、图6所示。

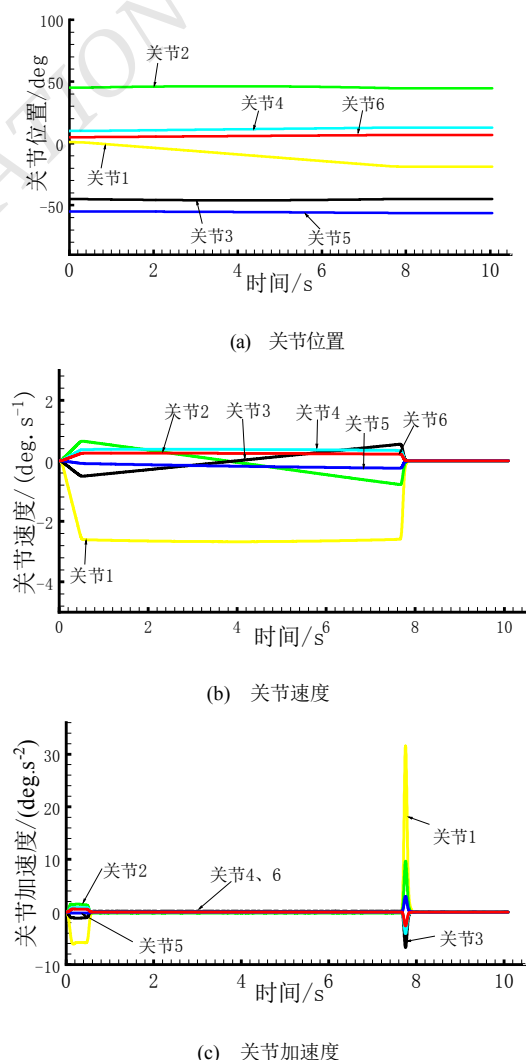
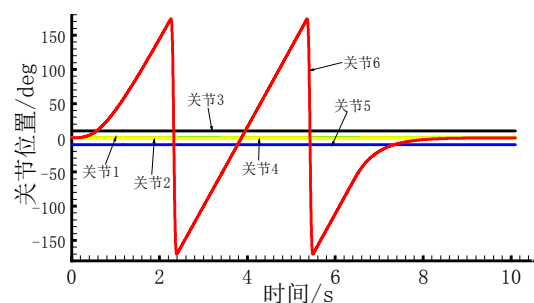
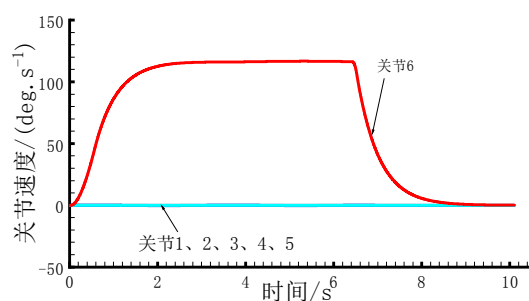


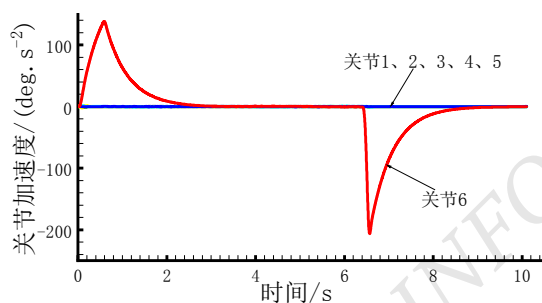
图5 IRB 1410 关节位置、速度、加速度曲线



(a) 关节位置



(b) 关节速度



(c) 关节加速度

图6 CA20N 关节位置、速度、加速度曲线(三机器人)

由图5、图6可以看出:螺旋轨迹完成时间由9s缩短至8s内,提高了效率;搬运机器人和焊接机器人的关节运动数量都有减少,总能耗比仅采用双机器人更低。

由图5(c)可以看出,焊接机器人关节加速度瞬时变化较小,不会导致力矩突然增大,理论数据可用于实验。

4 结论

本文针对三机器人协同焊接系统,建立与实验环境相匹配的多机器人仿真系统;并对双机器人、三机

器人完成螺旋曲线过程中,各机器人关节动力学特性展开研究。仿真结果表明,三机器人完成轨迹时间比双机器人更短,关节运动量更少。

通过仿真对比分析双机器人、三机器人完成相同轨迹时的各机器人关节差异,验证本文建立模型的正确性,为今后实验提供理论依据。为使多机器人系统面对不同任务场景时都能灵活、高效地完成复杂任务,将深度强化学习应用于多机器人轨迹规划是未来研究的重点。

参考文献

- [1] 龙樟,李显涛,帅涛,等.工业机器人轨迹规划研究现状综述[J].机械科学与技术,2021,40(6):853-862.
- [2] 甘亚辉.柔性化焊接系统中的多机器人协作控制研究[D].南京:东南大学,2014.
- [3] GAN Y, DUAN J, CHEN M, et al. Multi-robot trajectory planning and position/force coordination control in complex welding tasks[J]. Applied Sciences,2019,9(5): 924.
- [4] 张曦.多机器人协作焊接系统的算法研究与仿真实现[D].南京:东南大学,2015.
- [5] ABU-DAKKA F J, RUBIO F, VALERO F, et al. Evolutionary indirect approach to solving trajectory planning problem for industrial robots operating in workspaces with obstacles[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2013, 42(6):210-218.
- [6] LIU X M, QIU C R, ZENG Q F, et al. Kinematics analysis and trajectory planning of collaborative welding robot with multiple manipulators[J]. Procedia CIRP,2019,81:1034-1039.
- [7] LIU X M, QIU C R, ZENG Q F, et al. Time-energy optimal trajectory planning for collaborative welding robot with multiple manipulators[J]. Procedia Manufacturing, 2020,43:527-534.
- [8] BASILE F, CACCAVALE F, CHIACCHIO P, et al. Task-oriented motion planning for multi-arm robotic systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012,28(5): 569-582.
- [9] 牛启臣,张弓,张功学,等.多机器人轨迹规划研究综述及发展趋势[J].机床与液压,2021,49(12):184-189.

(下转第32页)