

虚拟环境下桥壳焊接机器人动力学及轨迹跟踪研究

吴思俊* 朱楠

(浙江工业职业技术学院, 绍兴 312000)

摘要:为解决人工焊接桥壳效率低、质量差等问题,建立一种可移动的桥壳截面焊接机器人模型,对其进行非完整动力学建模,并对焊接机器人移动平台和调整装置进行运动控制,最后以实际所需焊接桥壳截面为对象,验证该模型的可行性。研究表明:由于系统对移动平台和调整装置进行联合控制,提高了焊缝跟踪的精度及系统整体运动平顺性。本桥壳焊接机器人对于实现桥壳截面的焊接具有良好的适应性和鲁棒性,可实现对复杂焊接轨迹的跟踪控制。

关键词:虚拟环境;轨迹跟踪;动力学;机器人;桥壳焊接

中图分类号:TH122

文献标识码:A

doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2016.03.021

Dynamics and Trajectory Tracking Research on Axle Housing Welding Robot in Virtual Environment

WU Sijun* ZHU Nan

(Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000)

Abstract: In order to solve the issues of low efficiency and poor quality during artificial process of welding axle housing, a movable robot model of axle housing welding was established to realize the nonholonomic dynamics modeling of welding robot and move controlling of the welding robot motion control platform and adjusting device. Finally, the actual welding axle housing section is taken as the object to verify the feasibility of the axle housing welding robot model. The results show that due to the union controlling of the system to the mobile platform and adjusting device, the accuracy of welding seam trajectory and system ride comfort are improved. The axle housing welding robots has good adaptability and good robustness for welding axle housing section, and it can realize the complex trajectory tracking control.

Key words: virtual environment; trajectory tracking; dynamics; robot; axle housing welding

1 引言

近年来,随着工程领域大承载技术的发展,各大工程机械均朝着大吨位、大承载的方向发展。桥壳作为工程机械重要的承载部件,其性能好坏将直接决定整机的运转性能^[1]。但是截止目前,对于焊接桥壳一般的焊接方法均为人工焊接,焊接质量受到工人操作、环境条件等因素影响明显,效率也不高^[2]。因此,研发一类智能化、自动化桥壳焊接机器人显得十分必要。

国内外对于焊接机器人的研究正向着智能化、精密化方向发展,目前仍有很多亟待解决的问题,且很少有专门对桥壳焊接机器人进行研究的相关文献,但是对于其低级形式——焊接用机械臂进行了较为深入的研究,韩莉莉等^[3]重点研究焊接用机械臂主动变参数控制方法;郑国穗等^[4]根据静力学分

析结果对机械夹持手进行拓扑优化;高胜等^[5]通过对机械臂动力学建模、宏微空间分解与运动误差补偿进行机械臂运动控制。焊接机器人作为焊接机械臂的高级形式,相比于机械臂具有自主进行焊接路径规划及轨迹跟踪等功能。值得注意的是,张柯等^[6]讨论了具有自寻迹功能的移动焊接机器人的系统组成,对焊接坡口自寻迹过程中的位姿调整轨迹进行规划,最后对轨迹进行修正;李湘文等^[7]针对电弧传感焊接机器人系统的非完整约束性,建立了机器人运动学模型,讨论了两后轮控制输入的电弧传感焊接机器人轨迹跟踪问题。

上述科研人员对焊接机器人进行动力学建模时,只是对调整装置或机器人移动平台进行单独控制,不具有实时焊接路径规划及轨迹跟踪等功能。本文通过动力学及轨迹跟踪建模完善对焊接机器人移动平台和调整装置的联合控制,并引入时变控制增益得到焊接机器人的变结构控制模型。

2 动力学及轨迹跟踪建模

本文提出一种可移动的桥壳截面焊接机器人模

2015-09-21 收稿,2015-11-10 接受,2016-06-25 网络发表

* 通讯作者, E-mail: xjmount@gmail.com

型,该模型的具体三维模型如图 1 所示。桥壳焊接机器人机构下座为可移动平台,平台通过轮胎可在电机驱动下绕桥壳中心线运动,此外,模型焊枪可以在纵向和横向区域运动,这样在两机构共同作用下,焊枪能够较好地贴合所需焊接焊缝。

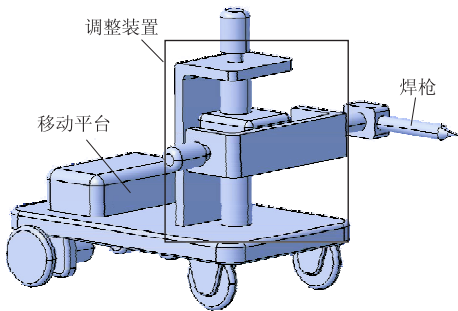


图 1 桥壳焊接机器人机构三维模型

由于桥壳所需焊缝纵向高度可以由辅助夹具控制,此时对于可移动桥壳焊接机器人只需对其横向轨迹进行研究即可,图 2 为桥壳焊接机器人模型在横向平面的示意图, OXY 、 $O_0X_1Y_1$ 分别为模型全局坐标系与移动坐标系,将可移动平台驱动轴轴线中点作为参考点,通过坐标变换,得到焊枪点 M 在全局坐标系中的位置和姿态表达式为^[8]

$$\begin{cases} x_2 = x_{0_0} - c\sin\theta + b\cos\theta \\ y_2 = y_{0_0} + b\sin\theta + c\cos\theta \\ \theta_2 = \theta \end{cases} \tag{1}$$

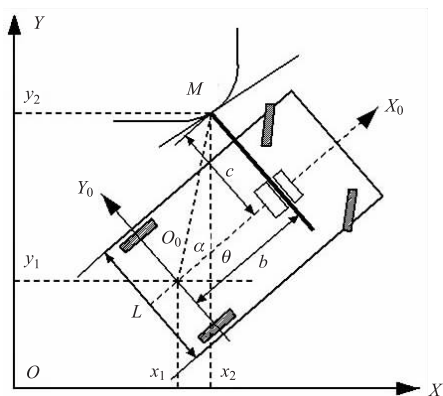


图 2 桥壳焊接机器人模型在横向平面示意图

桥壳焊接机器人系统焊枪点 M 非完整约束动力学模型为

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + V_m(q,\dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + A^T(q)f = \\ B(q)T - f_d \\ A(q)\dot{q} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中, q 为桥壳焊接机器人系统状态向量; $M(q)$ 为桥壳焊接机器人系统惯性矩阵; $V_m(q,\dot{q})\dot{q}$ 为与速

度、位置相关的向心力和哥氏力项; $F(\dot{q})$ 为与速度、位置相关的动静摩擦项; f 为未知扰动和未建模动力学; $B(q)$ 为与输入系数对应相关的矩阵; T 为控制输入向量; $A(q)$ 为约束矩阵; f_d 为约束反力。

将驱动轴左右两侧驱动轮运动规律与调整装置作为控制调节对象,假设焊枪点位置为 $P(x_w,y_w)$,将其作为焊缝轨迹系统输出数据,焊枪点运动方程表达式为^[9]

$$\begin{cases} x_2 = x_{0_2} + l\cos\alpha\cos\theta - (l\sin\alpha + X_c(t))\sin\theta \\ y_2 = y_{0_2} + (l\sin\alpha + X_c(t))\cos\theta + l\cos\alpha\sin\theta \\ l = \sqrt{b^2 + c_0^2}; \alpha = \text{ctan}\left(\frac{c_0}{d}\right) \end{cases} \tag{3}$$

式中, c_0 为系统中横向调整装置处于行程中心位置条件下,焊枪点 M 到移动焊接机器人中心线 X_0 的距离; $X_c(t)$ 为跟踪过程中焊枪点到机器人中心线的距离。

假设 e_0 为桥壳焊缝偏差的阈值; X_L 为横向调整装置移动的极限距离^[10]。

条件 1: $|X_c(t)| \leq X_L$

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 = -u_2(u_1\sin\theta + l_1u_2 + X_c(t)\cos\theta) \\ \ddot{y}_2 = u_2(u_1\cos\theta - l_2u_2 - X_c(t)\sin\theta) \end{cases} \tag{4}$$

式中, u_1 、 u_2 为辅助控制量,

$$L_1 = [l\cos\alpha\cos\theta - (l\sin\alpha + X_c(t))\sin\theta]$$
$$l_2 = [(l\sin\alpha + X_c(t))\cos\theta + l\cos\alpha\sin\theta]$$

如果 $|e_y| > e_0$ 时,对横向调整装置与机器人移动平台进行联合控制,此时:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta u_1 u_2 - l_1 u_2^2 - X_c(t) \cos\theta u_2 \\ \cos\theta u_1 u_2 - l_2 u_2^2 - X_c(t) \sin\theta u_2 \end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -(l\sin\alpha + x_b(t))\cos\theta - l\cos\alpha\sin\theta \\ \sin\theta & l\cos\alpha\cos\theta + (l\sin\alpha - X_b(t))\sin\theta \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

条件 2: $|X_c(t)| > X_L$

本条件下机器人移动平台单独参与偏差控制,即 $S_b(t) = 0$,随着后续工作状态的改变,焊枪偏差方向改变后,横向调整装置才开始向机器人中心位置移动。此时焊枪点状态为

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta u_1 u_2 - l_1 u_2^2 \\ \cos\theta u_1 u_2 - l_2 u_2^2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & -(l\sin\alpha\cos\theta - \cos\alpha\sin\theta) \\ \sin\theta & l\cos\alpha\cos\theta - \sin\alpha\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

最终得到桥壳焊接机器人动力学位置输出函数的解耦矩阵:

$$\begin{cases} \dot{q} = X(q)u \\ P = H + \Delta H + Af + \Delta Af \end{cases} \quad (7)$$

式中,

$$X(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = F\tau + D; \Delta H = F\Delta\tau$$

$$A = FG; \Delta A = F\Delta G$$

$$D = \begin{bmatrix} \cos\theta & -(l\sin\alpha + \dot{X}_c(t))\cos\theta - \cos\alpha\sin\theta \\ \sin\theta & l\cos\alpha\cos\theta - (l\sin\alpha + \dot{X}_c(t))\sin\theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 u_2 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$\tau = -uc_m I_d \frac{CB}{E + r^{-2} I_d g \Psi_g CB}$$

$$F = \begin{bmatrix} \cos\theta & -l\sin(\alpha + \theta) - \dot{X}_c(t)\cos\theta \\ \sin\theta & l\cos(\alpha + \theta) - \dot{X}_c(t)\sin\theta \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} m^{-1} & m^{-1} \\ \frac{L}{2}I^{-1} & -\frac{L}{2}I^{-1} \end{bmatrix}; \Psi = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 + 1 & 0 \\ 0 & \rho_1 + 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta\tau(q,u) = -r^{-2}c_m I_d \frac{\Psi CB_u}{E + r^{-2} I_d g \Psi_g CB} +$$

$$r^{-2}c_m I_d \frac{uCB}{E + r^{-2} I_d g CB}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{L}{2} & -\frac{L}{2} \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{r^{-1}C}{E + r^{-2} I_d g CB}$$

$$\Delta G = r^{-1} \left\{ \frac{\Psi}{E + r^{-2} I_m \Psi CB} - \frac{1}{E + r^{-2} I_m CB} \right\} C$$

此外, ε_1, ρ_1 为误差的参数组合; I 为桥壳焊接机器人相对 B 点的转动惯量。

定义切换函数为 $S_m = \dot{e} + c_0 e$, 用式(8)控制:

$$v = \hat{v} = k \operatorname{sgn} S_m \quad (8)$$

式中, e 为焊接过程中跟踪误差; c_0 为使等式成立时 $c_0 + c_1 S_m = 0$ 具有负实部的值; $k > 0$ 保证原点处满足滑模存在条件; $\hat{v}$ 为系统不确定项 $\Delta F = 0, \Delta A = 0$ 的等效控制。

这里引入时变控制增益 K , 保证不确定项满足式(9):

$$\|\Delta A A^{-1} \operatorname{sgn} S_m\| < 1 \quad (9)$$

最终得到输出跟踪问题的变结构控制器:

$$\tau = \hat{v} A^{-1} - H A^{-1} - \frac{k S_m A^{-1}}{\delta + \|S_m\|} \quad (10)$$

式中, δ 为连续化参数, S_m 为切换参数。

3 仿真计算

为了验证设计的轨迹跟踪算法的可行性, 这里将某型分段式桥壳焊接截面作为验证对象, 具体详见图 3, 本截面具有以下特点:

- 1) 由多段圆弧过渡组成。分段桥壳焊接截面由多段圆弧组成, 各圆弧半径尺寸变化大, 最小圆弧半径为 40 mm;
- 2) 工艺误差较大。分段桥壳需焊接个体在铸造及加工过程中存在一定的工艺误差。

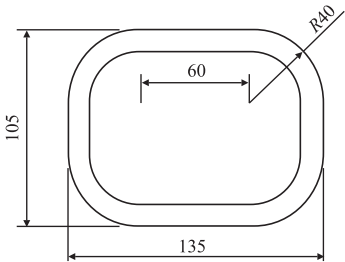


图3 分段式桥壳焊接截面结构图

桥壳焊接机器人整体沿桥壳焊接截面沿逆时针方向转动, 焊枪的期望速度为 $v_d = 5 \text{ mm/s}$, 焊接机器人最大调整角速度 $\omega = 0.02 \text{ rad/s}$, 焊枪初始位姿为: $P = (-5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}, 2^\circ)$ 。此外本桥壳焊接机器人的具体参数详见表 1。

表1 桥壳焊接机器人计算参数表

计算符号	数值
焊接机器人转动惯量 I	3.4 kg/mm ²
系统总质量 m	35 kg
动力传动系统粘性摩擦系数 C_m	0.02
驱动轮转动惯量 I_d	0.05 kg/mm ²
驱动轮半径 r	60 mm
焊枪点到机器人中心线距离 c	258 mm
驱动轴到焊枪轴的距离 b	430 mm

图 4 为桥壳焊接机器人针对图 3 所示所需桥壳焊接截面下焊枪与移动平台的轨迹曲线。分析图 4 可以发现, 在整个运动过程中焊枪与移动平台运动轨迹平滑完整, 没有出现波动变化。

图 5 为桥壳焊接机器人在分段式桥壳焊接截面

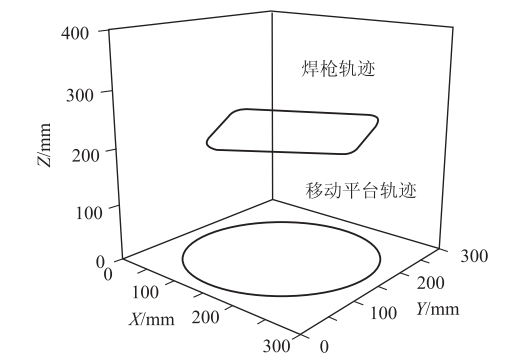


图 4 焊枪与移动平台轨迹曲线

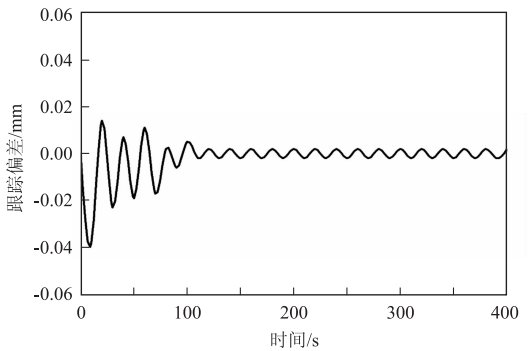


图 5 跟踪轨迹下焊枪跟踪误差

轨迹下焊枪的跟踪误差变化曲线。分析图 5 可知，跟踪偏差在 100 秒内误差较大,100 秒后趋于稳定。

图 6 为桥壳焊接机器人在分段式桥壳焊接截面轨迹下焊枪速度的变化曲线。分析图 6 可以发现，在初始阶段焊枪速度波动现象明显，速度变化曲线趋于稳定所需时间相较偏差变化曲线较长。

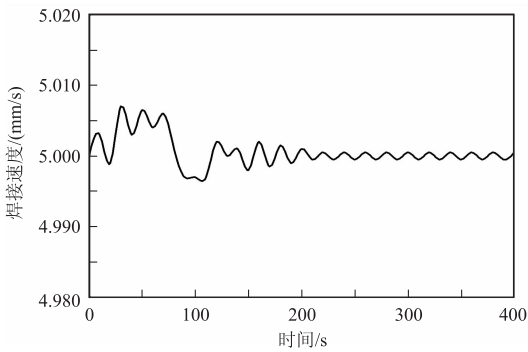


图 6 跟踪轨迹下焊接速度

图 7 为桥壳焊接机器人在分段式桥壳焊接截面轨迹下调整装置调整量的变化曲线。分析图 7 可以发现，调整量整体呈现下降趋势，调整量最大值出现在 50 秒时间点，最大值为 3.2 mm。

图 8 为桥壳焊接机器人在分段式桥壳焊接截面轨迹下左右两侧驱动轮转矩的变化曲线。分析图 8 可以发现，由于焊接机器人沿截面做逆时针运动，故

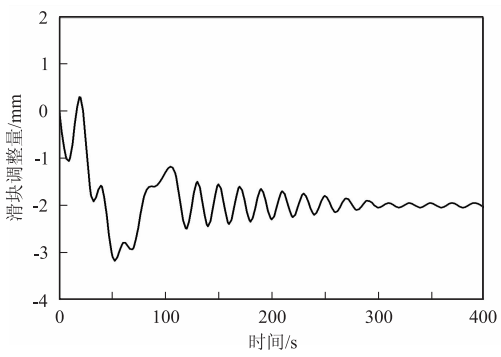


图 7 跟踪轨迹下调整装置调整量

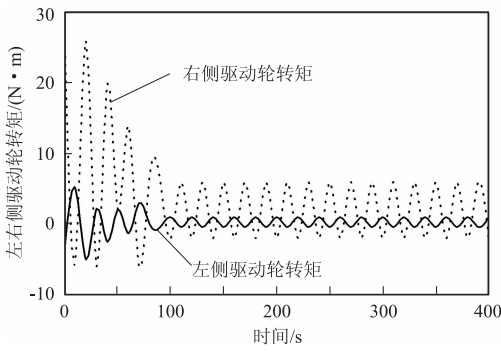


图 8 跟踪轨迹下左右两侧驱动轮转矩

右侧车轮转矩明显大于左侧车轮，在 100 秒时间后转矩变化趋于稳定。

由图 6~8 分析可知，通过对移动平台和调整装置进行联合控制，其各项指标参数变化趋向稳定，调整量整体呈现下降，体现了联合控制的桥壳机器人很好的鲁棒性。

4 结论

本文以驱动轴左右两侧驱动轮运动规律与调整装置作为控制调节对象,对横向调整装置与机器人移动平台进行联合控制,应用运动学与动力学相关理论对可移动的桥壳截面焊接机器人移动平台和调整装置进行非完整动力学建模。分析结果表明：

1) 由于系统对移动平台和调整装置进行联合控制,在较短时间范围内焊缝跟踪偏差较大,但随后偏差较小且变动趋于稳定。随着后续工作状态的改变,焊枪偏差方向改变后,根据偏差控制移动平台的横向调整装置就会向机器人中心位置移动。此外，移动平台右侧驱动轮转矩明显大于左侧车轮，焊枪与移动平台运动轨迹平滑完整,无明显波动。

2) 在分段式桥壳焊接截面轨迹下调整装置调整量整体呈现下降趋势,这表明联合控制的桥壳机

(下转第 593 页)

研磨,得到满意的刀具参数。

参考文献

[1] FANG Fengzhou, ZHANG Xiaodong, HU Xiaotang. Cylindrical coordinate machining of optical freeform surfaces [J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7323-7329.

[2] ZONG Wenjun, SUN Tao, LI Dan, et al. Nano-precision diamond cutting tools achieved by mechanical lapping versus thermo-mechanical lapping [J]. Diamond & Related Materials, 2008, 17(6): 954-961.

[3] QIU Zhongjun, ZHOU Libo, EDA H, et al. Development of A Vision guided Lapping System for Diamond Cutting tools [J]. International Conference on Precision Engineering and Micro/Nano Technology, 2005, 11(7): 282-285.

[4] 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[5] 李增强. 圆弧刀金刚石刀具刀尖圆弧的机械研磨及其检测技术

[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[6] 雷大江, 夏志辉, 何建国. 高精度金刚石刀具研磨关技术研究 [J]. 制造技术与机床, 2011, (11): 139-141.

[7] KOSLOWSKI B, STROBEL S, ZIEMANN P. Ion Polishing of a Diamond(100) Surface Artificially Roughened on the Nanoscale [J]. Diamond and Related Materials, 2000, 9(3): 1159-1163.

[8] WEIMA J A, FAHRNER W R, JOB R. Experimental Investigation of the Parameter Dependency of the Removal Rate of the Thermochemically Polished CVD Diamond Films [J]. Solid State Electrochem, 2001, 5(2): 112-118.

[9] 张竞敏. 单晶体金刚石刀具的新型加工方法 [J]. 工具技术, 1999, 33(10): 10-11, 18.

[10] QIU Z J, FANG F Z, DING L Y, et al. Investigation of diamond cutting tool lapping system based on on-machine image measurement [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(1-4): 79-86.

(上接第 587 页)

机器人具有很好的鲁棒性,为后续工程运用提供了一定的参考依据。通过桥壳焊接机器人焊接桥壳截面实际情况,验证了本文所提桥壳焊接机器人模型的可行性。

参考文献

[1] REN Chao, MA Shugen. Generalized proportional integral observer based control of an omnidirectional mobile robot [J]. Mechatronics, 2015, 26: 36-44.

[2] ZHANG Ancai, LAI Xuzhi, WU Min, et al. Stabilization of underactuated two-link gymnast robot by using trajectory tracking strategy [J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 253(15): 193-204.

[3] 韩莉莉, 刘广瑞, 许军辉, 等. 柔性机械臂弹性振动的主动变参数控制研究 [J]. 机械传动, 2008, 37(12): 39-42.

[4] 郑国穗, 卢军, 马金锋. 机械夹持手的优化设计与分析 [J]. 机械

传动, 2014, 38(3): 98-101.

[5] 高胜, 张飘石, 刘巨保. 刚柔混合宏微机械臂运动补偿与控制 [J]. 机械传动, 2014, 38(3): 39-42.

[6] 张柯, 吴毅雄, 金鑫, 等. 移动焊接机器人坡口自寻迹位姿调整的轨迹规划 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 215-220.

[7] 李湘文, 洪波, 尹力, 等. 基于滑模控制器的电弧传感焊接机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(11): 73-79.

[8] 陶兴华, 朱宏武, 曾义金, 等. 膨胀波纹管焊接机器人的研制及其机构运动分析 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 119-128.

[9] 刘成良, 张凯, 付庄, 等. IVECO 横梁焊接机器人轨迹规划及计算机仿真研究 [J]. 机器人, 2011, 23(7): 601-604.

[10] 祁若龙, 周维佳, 刘金国, 等. VC 平台下机器人虚拟运动控制及 3D 运动仿真的有效实现方法 [J]. 机器人, 2013, 35(5): 594-599.