

# 一种并联激光焊接机器人的机构设计与运动学分析

孙元, 姜春英, 朱思俊, 赵明扬

(中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 提出了一种 3 分支 5 自由度的并联激光焊接机器人, 通过 3 个分支共同作用, 使整机具备了 5 个自由度的空间加工能力. 针对激光焊接, 通过分析该机器人的结构特性, 建立了其正反解运动学模型, 通过解析法求解该模型并进行了计算仿真. 最后, 对机器人进行激光拼焊实验, 仿真数据和实验结果表明, 本文研究的并联机器人机构适用于实际的高速、高精度激光焊接.

**关键词:** 5 自由度; 激光焊接; 并联机构

**中图分类号:** TP242.2

**文献标识码:** B

## Mechanism Design and Kinematics Analysis of a Parallel Manipulator for Laser Welding

SUN Yuan, JIANG Chunying, ZHU Sijun, ZHAO Mingyang

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** A parallel laser welding robot with three legs and five degrees-of-freedom (DOF) is proposed. The parallel robot has spatial working capacities of five DOFs due to its three legs. The forward and inverse kinematics models of this parallel robot are built for laser welding by analyzing its structure characteristics. Then the analytical method is employed to solve the models and the computer simulation is carried out. Finally, the experiments of laser welding with this parallel robot are implemented. The simulation and experiment results show that the proposed parallel robot is suitable for actual laser welding with high speed and high accuracy.

**Keywords:** 5-DOF; laser welding; parallel mechanism

### 1 引言 (Introduction)

激光焊接是利用激光束作为热源的一种热加工工艺, 采用无接触加工方式, 具有自动化程度高、焊接速度快、功效高以及加工质量稳定可靠、经济效益和社会效益好等一系列优点<sup>[1]</sup>.

并联机构是 Hunt<sup>[2]</sup> 于 1978 年提出的, 因其具有刚度高、承载能力强、惯量小、动力学性能好、有误差平均效应等优点, 因此很快成为机器人研究领域的热点, 并在飞行模拟器设计<sup>[3-5]</sup>、并联机床、微位移技术等方面得到广泛的应用.

本文研究的并联激光焊接机器人将并联机构与激光焊接加工结合起来, 避免了机械加工中切削力因素引起的机床误差, 同时将并联机构动力学性能好的优点集成到激光加工中, 从而开拓了并联机构机器人用于激光加工的应用领域.

### 2 机构概念设计 (Mechanism conceptual design)

并联激光焊接加工机器人结构如图 1 所示.



图 1 5 自由度激光焊接机器人结构

Fig.1 Structure of 5-DOF laser welding robot

此机器人机构可分为并联和串联两个组成部分. 在并联机构中, 与以往并联机构不同的是, 省略掉了动平台, 而是采用 3 个分支通过同心约束相互

连接起来. 3 个分支均通过虎克铰与静平台连接. 而整个并联部分由安装在 3 个分支上的 3 个移动副驱动. 其中 2 个分支末端通过 3 个转动副最终与主支相连. 这样, 整个并联机构为 UP-2UPS 结构. 并联机构下面与串联部分连接, 组成串联部分的结构为 2 个转动副. 通过串联这 2 个转动副, 拓展了机器人的加工空间, 使其能完成空间曲线加工任务.

### 3 运动学反解 (Inverse kinematics)

机构的位姿分析旨在求解机构主动构件与输出构件之间的位姿关系, 是机构运动学分析的基础<sup>[6-7]</sup>. 其内容包括位置正解和位置反解. 本文研究的机构是并联与串联两部分综合的结果, 因此在分析时对并联与串联部分分别求解位置正反解, 最终综合得到整个机构的位姿关系.

对此模型进行分析, 它是一种并联与串联混合机构, 由此机构特点不难发现, 机构的运动主要受主支的控制. 因此, 对机构进行反解运算时, 主要分析主支串联部分的反解模型, 然后根据得到的主支虎克铰的转角来确定并联分支部分的杆长参数.

首先分析整机的反解. 图 2 为机器人机构原理图, 图中并联部分由 3 个分支  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  构成, 其中  $L_1$  与  $L_3$  结构相同, 均为 UPS 机构. 而  $L_2$  分支为 UP 机构.  $L_1$  和  $L_3$  分支与  $L_2$  分支连接, 满足同心约

束条件, 使并联机构具有 3 个自由度. 在并联机构的下方是 2 个转动副构成的机器人串联部分. 首先, 参照一般机器人坐标系建立方法<sup>[8]</sup>, 按照相对坐标变换形式进行坐标变换, 建立固定参考坐标  $O$ -XYZ, 静平台 T 上各点  $B_1$ 、 $O$  和  $B_3$  均以坐标系  $O$ -XYZ 为参考, 设置初始时刻的活动坐标系与固定坐标系相同, 设定机器人各部分活动坐标系  $S_1$ - $X_{S1}Y_{S1}Z_{S1}$ 、 $S_2$ - $X_{S2}Y_{S2}Z_{S2}$ 、 $O_1$ - $X_1Y_1Z_1$ 、 $O_2$ - $X_2Y_2Z_2$  和  $O_3$ - $X_3Y_3Z_3$ .

设定  $L_2$  分支中与静平台相连的绕 X 轴旋转的虎克铰旋转角度为  $\alpha$ , 虎克铰绕 Y 轴的旋转角度为  $\beta$ . 3 个分支的杆长分别为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ , 串关节回转动副和俯仰转动副的旋转角分别为  $\gamma$  和  $\theta$ , 则由位姿坐标变换可得到:

$$T_{O_3}^O = T_{S_1}^O \cdot T_{S_2}^{S_1} \cdot T_{O_1}^{S_2} \cdot T_{O_2}^{O_1} \cdot T_{O_3}^{O_2} \quad (1)$$

式中

$$T_{S_1}^O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{S_2}^{S_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{O_1}^{S_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{O_2}^{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{O_3}^{O_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{O_1}^O = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{O_2}^{O_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{O_3}^{O_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

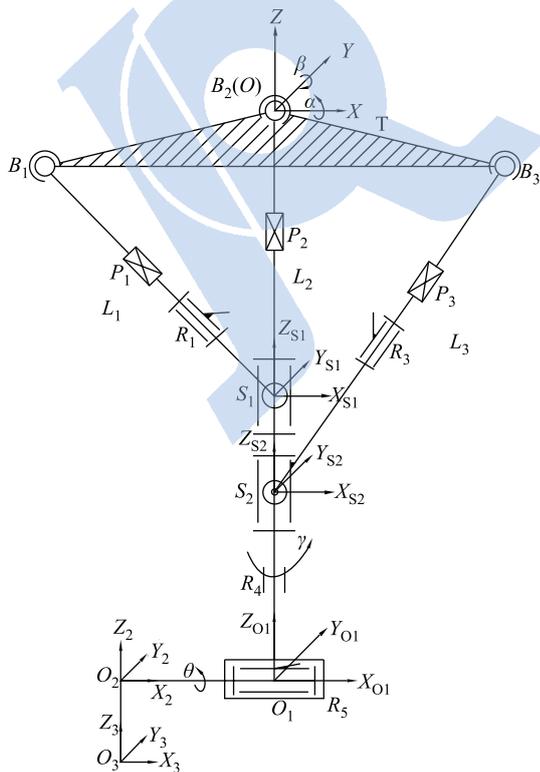


图 2 机器人机构简图

Fig.2 Sketch of robot mechanism

已知机器人末端执行器相对固定参考坐标系  $O$ - $XYZ$  的位姿矩阵为

$$\mathbf{T}_{O_3}^O = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据上式得到的结果, 矩阵对应相等, 得到反解求解方程组:

$$n_x = \cos \beta \cdot \cos \gamma \quad (3)$$

$$n_y = \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \alpha \cdot \sin \gamma \quad (4)$$

$$n_z = -\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma \quad (5)$$

$$o_x = -\cos \beta \cdot \sin \gamma \cdot \cos \theta + \sin \beta \cdot \sin \theta \quad (6)$$

$$o_y = (-\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma) \cdot \cos \theta - \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta \quad (7)$$

$$o_z = (\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \sin \alpha \cdot \cos \gamma) \cdot \cos \theta + \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta \quad (8)$$

$$a_x = \cos \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \theta + \sin \beta \cdot \cos \theta \quad (9)$$

$$a_y = -(-\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma) \cdot \sin \theta - \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta \quad (10)$$

$$a_z = -(\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \sin \alpha \cdot \cos \gamma) \cdot \sin \theta + \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta \quad (11)$$

$$p_x = p \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma + (m+n+L_2) \cdot \sin \beta + q \cdot (\cos \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \theta + \sin \beta \cdot \cos \theta) \quad (12)$$

$$p_y = p \cdot (\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \alpha \cdot \sin \gamma) - (m+n+L_2) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + q \cdot [(-\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \cos \alpha \cdot \cos \gamma) \cdot \sin \theta - \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta] \quad (13)$$

$$p_z = p \cdot (-\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \sin \alpha \cdot \sin \gamma) + (m+n+L_2) \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta + q \cdot [(-\cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma + \sin \alpha \cdot \cos \gamma) \cdot \sin \theta + \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta] \quad (14)$$

从方程 (3) ~ (14) 中任取 5 个进行求解, 即可求得  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $L_2$  这些变量. 根据求解得到的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $L_2$ , 将  $\mathbf{T}_{S_2}^O$  和  $\mathbf{T}_{O_1}^O$  求解出来, 得到  $S_2$  和  $O_1$  在固定参考坐标系  $O$ - $XYZ$  中的坐标, 则有下式:

$$\overrightarrow{OS_2} = (L_2 \sin \beta, -L_2 \sin \alpha \cos \beta, L_2 \cos \alpha \cos \beta)^T \quad (15)$$

$$\overrightarrow{OO_1} = ((L_2 + S_1 S_2) \cdot \sin \beta, -(L_2 + S_1 S_2) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta, (L_2 + S_1 S_2) \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta)^T \quad (16)$$

在固定平台  $OB_1B_3$  中, 设定  $\triangle OB_1B_3$  为等边三角形, 边长为  $a$ , 则很容易得到:

$$\overrightarrow{OB_1} = \left(-\frac{1}{2}a, -\frac{\sqrt{3}}{2}a, 0\right)^T \quad (17)$$

$$\overrightarrow{OB_3} = \left(\frac{1}{2}a, -\frac{\sqrt{3}}{2}a, 0\right)^T \quad (18)$$

则根据矢量关系有如下公式:

$$\overrightarrow{S_2B_1} = \overrightarrow{OS_2} - \overrightarrow{OB_1} \quad (19)$$

$$\overrightarrow{S_2B_3} = \overrightarrow{OS_2} - \overrightarrow{OB_3} \quad (20)$$

这样可以求解出其他两杆长度为:

$$L_1 = \left| \overrightarrow{S_2B_1} \right| \quad (21)$$

$$L_3 = \left| \overrightarrow{S_2B_3} \right| \quad (22)$$

#### 4 运动学正解 (Kinematic forward solution)

与反解过程正好相反, 已知机器人的关节变量  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $\gamma$ 、 $\theta$ , 求解机器人末端位姿矩阵.

根据关节变量  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  长度, 以及  $B_1$ 、 $O$ 、 $B_3$  点坐标列距离方程求解  $L_2$  分支虎克铰绕  $X$  轴和绕  $Y$  轴的旋转角度  $\alpha$  和  $\beta$ . 其求解方程如下:

$$L_2^2 = L_2^2 \cdot \sin^2 \beta + L_2^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta + L_2^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta \quad (23)$$

$$L_1^2 = (L_2 \cdot \sin \beta + \frac{1}{2}a)^2 + (-L_2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + \frac{\sqrt{3}}{2}a)^2 + L_2^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta \quad (24)$$

根据得到的  $\alpha$  和  $\beta$ , 将已知的  $L_2$ 、 $\gamma$ 、 $\theta$  代入到位姿变化矩阵, 即可解得机器人的末端位姿矩阵.

#### 5 仿真计算 (Simulation computation)

图 3 和图 4 给定了加工工件的形状和轨迹, 根据给定的轨迹赋予机器人算法相关的运动参数, 利用其反解, 运用 Matlab 进行仿真计算, 得到的仿真结果如图 5 所示. 经过仿真计算, 机器人能够准确走出规划的空间曲线轨迹.

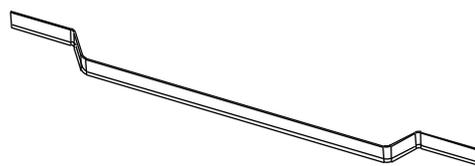


图 3 加工工件的形状

Fig.3 The shape of processed workpiece

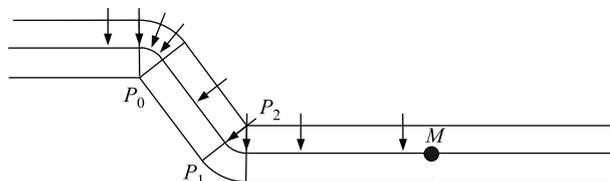


图 4 加工工件的轨迹

Fig.4 The path of processed workpiece

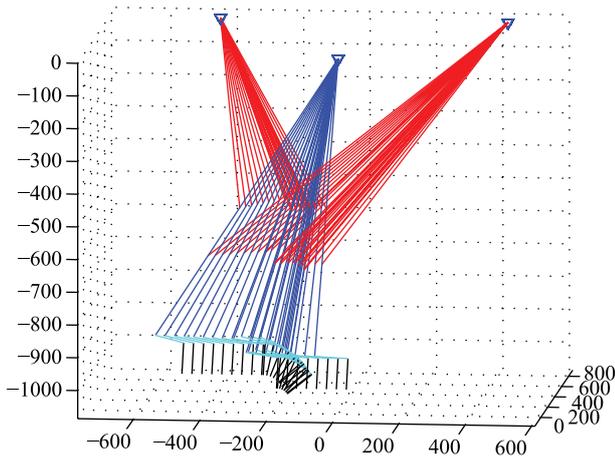


图5 机器人仿真结果

Fig.5 The simulation result of robot

## 6 实验研究 (Experimental study)

利用机器人平台,对普通冷轧薄钢板进行激光焊接实验.在机器人末端连接激光焊接头,采用光束移动、试件固定方式进行焊接.采用手工上料夹紧,对厚度为1.6 mm和2.5 mm的普通冷轧钢板进行拼接焊接,激光器输出功率为2.8 kW,焊接过程如图6所示.



图6 机器人激光焊接过程

Fig.6 The process of robot laser welding

得到的焊接试验样件如图7所示,为400 mm焊缝长度的激光焊接样件,焊缝平整、连续、均匀,进而验证了机器人的运动准确和连续性.

## 7 结论 (Conclusion)

提出一种三支五自由度并联激光焊接机器人机构,此机构并联部分将3个分支通过同心约束连接,使得结构紧凑,提高了负载能力.对该机构进行运动学分析,其正反解均为解析解,具有实时性强、易于控制等优点.同时,对该算法进行加工仿真验证,验证了其正确性.按照本机构构型研制了一台

激光焊接设备,并进行了激光拼焊试验,进一步验证了机器人的运动准确性和连续性,具有一定的实用价值.

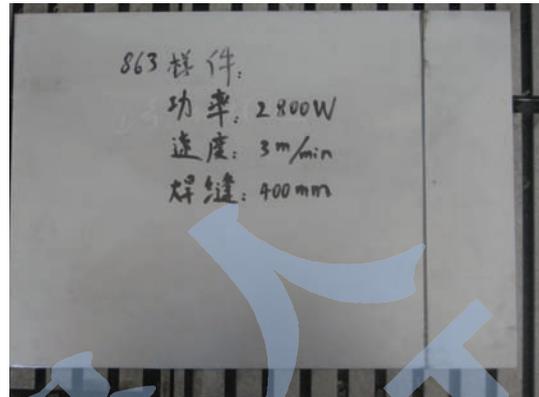


图7 机器人焊接样件

Fig.7 The sample of robot welding

## 参考文献 (References)

- [1] 游德勇, 高向东. 激光焊接技术的研究现状与展望 [J]. 焊接技术, 2008, 37(4): 5-9.  
You Deyong, Gao Xiangdong. Studies and prospect of laser welding technology[J]. Welding Technology, 2008, 37(4): 5-9.
- [2] Hunt K H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1983, 105(4): 705-712.
- [3] Tsai L W. Robot analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators[M]. New York, USA: Wiley, 1999: 116-117.
- [4] Zhang W J, Zou J, Watson L G, et al. The constant-Jacobian method for kinematics of a three-DOF planar micro-motion stage[J]. Journal of Robotic Systems, 2002, 19(2): 63-72.
- [5] Ohya Y, Arai T, Mae Y, et al. Development of 3-DOF finger module for micro manipulation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 894-899.
- [6] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
Huang Zhen, Zhao Yongsheng, Zhao Tieshi. Advanced spatial mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [7] 张曙. 并联运动机床 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
Zhang Shu. Parallel kinematics machine tool[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [8] 张威, 赵新华. 3-RTT 并联机器人位置分析 [J]. 天津理工学院学报, 2003, 19(3): 32-35.  
Zhang Wei, Zhao Xinhua. Position analysis of the 3-RTT parallel manipulator[J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 2003, 19(3): 32-35.

## 作者简介:

孙元 (1983-), 男, 硕士, 助理研究员. 研究领域: 激光拼焊, 机器人学.

姜春英 (1978-), 女, 博士, 副研究员. 研究领域: 以机器人系统为应用背景的机电测控技术, 智能激光焊接技术.