

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.028

# 焊接机器人轨迹规划的研究现状

付晓龙<sup>1</sup>, 何建萍<sup>1\*</sup>, 王付鑫<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海工程技术大学 基础教学学院, 上海 201620)

**摘要:**为了提高焊接效率、改善焊接质量的实际生产需求,对焊接机器人空间轨迹规划的方法及研究现状进行了综述,对关节轨迹规划法和笛卡尔轨迹规划法做出了比较,指出了轨迹规划中存在的问题即如何更便捷地实现最优轨迹规划和多种最优算法的统一,认为空间轨迹同焊接工艺参数进行联合规划将是未来研究的重点和方向。

**关键词:**焊接机器人;轨迹规划;焊接工艺;联合规划

中图分类号:TP242.2

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)02-0110-04

## Research Status on Trajectory Planning of Welding Robot

FU Xiaolong<sup>1</sup>, HE Jianping<sup>1\*</sup>, WANG Fuxin<sup>2</sup>

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. School of Basic Teaching, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The methods and research status on trajectory planning of welding robot were introduced to meet the actual need of production with high welding efficiency and welding quality. Comparisons between joint trajectory planning method and cartesian trajectory planning method were made. Some existing problems in trajectory planning were pointed, such as how to achieve the optimal trajectory planning more easily, how to achieve the unification of multiple optimal algorithms and so on. The combined planning as the trajectory planning with welding procedure parameters is also the key point in future study and research direction.

**Key words:** welding robot; trajectory planning; welding procedure; combined planning

焊接机器人是指在焊接生产领域代替焊工从事焊接任务的工业机器人,具有自由度高、自动化程度高、焊接质量稳定、提高生产效率、改善劳动条件及可替代人工在恶劣的工作条件下连续工作等优点,在机械加工、兵器工业、电子电器和食品工业及其他制造行业中应用广泛<sup>[1]</sup>。

在实际生产中的很多领域都需要用到焊接机器人在三维空间的焊接,如管-管、管-板、管-球等相贯线的焊接,球罐的焊接,压力容器的焊接,石油平台导管架管道的焊接等。所以对焊接机器人在三维空间内进行轨迹规划,并辅以合理的焊接工艺参数,不仅可以使焊接机器人按照最优路径进行施焊,还可进一步改善焊接质量、提高生产效率、节约生产成本,在实际的工业

生产中具有重要意义。

## 1 空间轨迹规划方法及研究现状

### 1.1 空间轨迹规划及方法

焊接机器人在规定时间内按照一定的速度和加速度,从初始状态移动到某个规定的目标状态的过程,就是焊接机器人的轨迹规划<sup>[2]</sup>。所以对焊接机器人进行轨迹规划主要包括三方面内容:首先是任务的描述,主要是对焊接机器人焊枪的运动轨迹进行确定;然后对所确定轨迹运用计算机语言进行描述;最后对位置、速度及加速度进行实时计算,从而得到运动轨迹。

焊接机器人的空间轨迹规划方法主要有关节空间轨迹规划法和笛卡尔空间轨迹规划法2种。

关节轨迹规划法的关键是将关节变量表示为时间

收稿日期:2014-10-17;修回日期:2014-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275283);上海市科委基础研究重点资助项目(14JC1402700)

作者简介:付晓龙(1989),男,河南遂平人,硕士研究生,主要研究方向为管-管相贯线焊接机器人运行轨迹及焊接工艺。

E-mail:janejphe@sues.edu.cn

的函数,用其一阶和二阶导数描述焊接机器人的轨迹。东南大学的孟正大联合昆山工研院的赵娇娇等针对“昆山一号”焊接机器人关节空间的实际需求,并结合焊接机器人的实时轨迹插补算法,提出了“昆山一号”的关节空间轨迹规划方法,成功实现了该机器人的关节空间运动,所规划出的运行轨迹平滑、速度连续、满足可调速性和实时性的要求,同时扩展性能良好<sup>[3]</sup>。该方法也成功应用于“昆山一号”的实际焊接工作中,所得焊缝均满足焊接工艺要求。这是国内自主研发焊接机器人的同时成功进行关节空间轨迹规划所迈出的重要一步,为今后该方面的研究奠定了良好的基础。

笛卡儿轨迹规划则是将焊枪的位置姿态、速度和加速度表示为时间的函数,再通过坐标转换导出相对应的焊枪关节位置、速度和加速度。笛卡尔空间轨迹规划法包括圆弧插补法、样条曲线插补法、直线插补法和 FLYBY 插补法等<sup>[4]</sup>。直线插补、圆弧插补和样条曲线插补等单一类型的轨迹插补在文献[5-8]分别做了介绍,复杂曲线则可以通过直线或圆弧进行拟合插补<sup>[9-10]</sup>,文献[11]研究的是关节空间和笛卡儿空间的通用插补算法,但该算法运算量大,较为复杂,无法进行动态控制。此外,也有一些轨迹插补方法能够满足实时性的要求。但仍然很难找到一种通用的轨迹插补算法,使得既能在时间上满足实时性,又可以平滑调速,同时完成笛卡儿空间和关节空间各种类型的插补。

## 1.2 空间轨迹规划的研究现状

早在 1997 年, K Abdel-Malek 和 H J Yeh<sup>[12]</sup>就提出了一种数学的分析计算方法来验证机械臂在空间运行轨迹的准确性和完整性,以确保机械臂焊接过程的顺利进行和焊缝的完整,为后来的焊接机器人空间轨迹规划提供了数学依据;1999 年德国人 Christian Wurll 和 Dominik Henrich<sup>[13]</sup>对 6 自由度工业机器人的点到点和多目标空间轨迹规划提出了最优轨迹规划方法,在保证焊接质量的前提下进一步提高了焊接机器人的焊接效率;T P Pachidis 和 J N Lygouras<sup>[14]</sup>提出了弧焊机器人系统的基于视觉的整体路径生成办法;上海交通大学的张珂等<sup>[15]</sup>2005 年研究了针对移动焊接机器人坡口自寻迹位姿调整的轨迹规划算法,该算法跟踪精度高,易实现,实际的工程应用价值较高;2006 年上海交通大学的周律等<sup>[16]</sup>又提出了一种基于局部视觉的弧焊机器人自主焊缝轨迹规划方法;北京航空航天大学汪苏等<sup>[17]</sup>于 2010 年针对骑座式相贯线焊缝提出了焊接机器人的连续轨迹规划,为该类型焊缝的焊接机器人轨迹规划提供了有力的依据及算法支持;

2012 年天津大学的 Chen 等<sup>[18]</sup>对 J 型坡口焊接接头的焊接机器人提出了针对管球相贯线焊接的一种空间轨迹规划方法,该方法在提高焊接效率的同时还能使焊接质量有很大改善,在目前的管球相贯线焊接生产中具有很大的实用价值和应用前景;天津工业大学的王天琪等<sup>[19]</sup>研究的多层多道焊机器人轨迹规划则是针对石油平台管道 T 型焊缝的;江南大学的陈鲁刚等<sup>[20]</sup>2011 年通过 ADAMS 软件求解焊接机器人的逆运动学,为焊接机器人的轨迹规划及样机试验提供了一条快捷的途径;中国工程物理研究院的曾翠华等<sup>[21]</sup>基于弗莱纳-雪列空间矢量针对焊接球罐和圆柱的空间曲线焊缝进行了焊接机器人离线编程轨迹规划,有效阐述了焊接机器人离线编程技术的弗莱纳-雪列空间矢量原理和轨迹规划算法;在空间轨迹和焊接工艺参数联合规划方面,南昌航空工业学院的王晓峰<sup>[22]</sup>迈出了重要一步,他联合规划了弧焊机器人的焊接姿态参数和焊接工艺参数,对机器人自动化焊接过程具有重要的实际意义。

以上研究表明,国内外对焊接机器人空间轨迹规划的研究越来越广泛和深入,越来越有针对性。但与此同时,他们的研究却也存在着一定的局限性,并不能完全适用于所有的焊接机器人空间轨迹规划。在上述研究中, T P Pachidis 和 J N Lygouras 的方法主要适用于很难确定具体焊接路径的交通工具的焊接生产中,如造船厂破损轮船的修复;运用周律、陈善本的方法分别获取低碳钢和铝合金对接焊缝的焊缝坐标时,低碳钢的焊缝坐标精度要明显高于铝合金;汪苏的方法则主要针对实际工程中的连续轨迹规划;天津大学王天琪的规划结果可用于 T 型管道接头移动式焊接机器人的自动焊接中,但未考虑由管道安装和机器人工件标定产生的误差,在今后的研究中可考虑借助焊缝跟踪来反馈控制焊接机器人进行焊接,所以该规划方法还需进一步完善才可投入实际应用。综合来看,上述研究都是单纯地对焊接机器人进行空间轨迹规划,并没有将焊接机器人的工艺参数融入空间轨迹规划当中,若要在保证焊接质量的同时进一步提高焊接效率,焊接机器人的空间轨迹规划就必须和焊接工艺参数结合起来。而王晓峰虽然将焊接姿态和焊接工艺参数进行了联合规划,但也只局限于焊枪的姿态同焊接工艺参数之间的联系,并没有将焊枪的空间运行轨迹、焊枪的位置同焊接工艺结合在一起。

## 1.3 最优轨迹规划的研究现状

最优轨迹规划的优化指标有 2 种,分别为能量最

优和时间最优。针对时间最优轨迹规划的研究要比针对能量最优轨迹规划的研究更多和更为热门。

对于能量最优,早在 1996 年针对冗余机器人的轨迹生成问题,Hirakawa 和 Kawamura 采用了变分法和 B 样条曲线法对焊接机器人系统消耗的能量进行了最优化,2002 年 Garg 和 Kumar 采用遗传算法和自适应模拟退火算法,以焊接机器人力矩最小作为优化目标得到了机器人移动的最优轨迹,其主要针对的是 2 个连杆机器人和 2 个协调操作机器人<sup>[23]5</sup>。

对于时间最优轨迹规划的求解,主要有 2 种类型的方法<sup>[24]</sup>:可利用最大速度及加速度约束条件求解;也可通过各种非线性约束最优化算法求解。后者主要针对具有动力学或运动学约束的机器人。很多学者基于机器人运动学研究出时间最优轨迹规划算法:如 Lin 等人提出的一种最优时间轨迹规划方法,就是基于机器人在位置、速度、加速度和二阶加速度方面的运动学约束<sup>[4]2</sup>;在相同运动学约束下,Tondu 等也提出了相似的规划方法,不同的是,他们用带有光滑转折的折线将关节空间中的关键点连接到一起,达到了简化的效果<sup>[25]</sup>;Bazaz 等认为在基于速度和加速度约束的前提下,连接关节空间中各关键点的最简单多样式曲线是三次样条曲线,以此为依据他们首先提出了一种算法,但该算法可能会使机器人在移动过程中发生振动,这是由于使用三次样条曲线时在关节空间关键点的连接处未将加速度的连续性考虑进去<sup>[23]4</sup>;后来 Bazaz 等人综合之前的方法,将连接关节空间关键点的曲线换成带有光滑转折的三次曲线段,设计出了新的算法<sup>[26]</sup>;Choi 等提出了一种全新的方法求解轨迹规划,仅使用运动学方法并通过进化策略求解优化模型,该方法主要针对精确动力学方程难以获得的焊接机器人<sup>[27]</sup>。

上述研究虽然针对特定情况或在特定前提下都提出了各自的机器人最优轨迹规划算法,但每种算法也都有着各自的缺陷:Lin 的算法是一种局部搜索算法,其算法的性能取决于初始条件的选取;Tondu 算法得到的轨迹中无法对给定的中间点进行插值操作;而 Choi 过度简化了原本的优化问题,其算法过于简单。在运动学和动力学约束条件下,很多优化算法如神经网络算法、遗传算法、改进的混沌优化算法、黄金分割法等,不但能较容易且有效地实现焊接机器人时间最优轨迹的规划,而且能够快速求解,减少运行时间。由此看来,目前尚无一种通用的优化算法来进行焊接机器人的最优轨迹规划<sup>[28-29]</sup>。

## 2 空间轨迹与焊接工艺参数联合规划

将焊接机器人的空间轨迹与焊接工艺参数进行联合规划,对焊接机器人的自动化焊接过程具有重要的现实意义。这是由于焊接工艺参数的规划会因为工件材料和形状的变化、焊缝空间位置的变化以及焊接工艺要求的变化作出调整,而空间轨迹的规划是焊枪在三维空间的连续曲线轨迹、焊枪的无碰撞运动以及焊枪位置姿态的综合设计与优化,如果将机器人空间轨迹和焊接工艺参数联合进行规划,必然能够提升焊接效率,改善焊接质量。国内王晓峰所做的焊接姿态与工艺参数的联合规划,并没有将焊枪的空间运行轨迹、焊枪的位置同焊接工艺参数有效地结合在一起,也没有对焊缝成形等焊接质量进行分析。只有将焊枪的位置姿态、焊接路径与焊接参数紧密结合在一起,才能得到良好的焊接质量。这主要体现在两个方面:首先在工艺参数中,焊枪的焊接速度、行走角和工作角尤为重要,而焊接速度是由机器人末端执行器的运动速度决定的,焊枪施焊的行走角和工作角是由机器人的焊枪姿态决定的;其次,从焊接质量控制和焊接工艺的角度,焊接速度、焊枪行走角、工作角等工艺参数的调整必须在焊接机器人空间轨迹的规划中得以实现。

此外,在焊接机器人施焊过程中,焊接电流、电压的选择,是否带脉冲,摆弧与否、摆幅的大小,随着焊枪焊接位置的变化如何保证熔滴的平稳过渡等焊接工艺问题,都需要同空间轨迹的规划结合在一起考虑,才能保证焊缝的最终质量。

## 3 结论和展望

对比焊接机器人的 2 种空间轨迹规划方法可以得出:笛卡尔轨迹规划法比关节轨迹规划法得到的轨迹更直观,更易于在其它焊接机器人上复现;关节轨迹规划法计算较简单,笛卡尔轨迹规划法计算量大,会导致控制间隔拖长;笛卡尔轨迹规划法即使给定的路径点在机器人的工作范围内,也不能保证轨迹的所有点都在机器人工作范围之内,而关节轨迹规划法则不存在这个问题;此外,笛卡尔空间轨迹规划法有时会发生机构奇异性的问题。

在焊接机器人空间运行轨迹规划的研究中,如何找到一种通用的轨迹插补算法来同时完成 2 种空间轨迹规划中各种类型的插补、如何更便捷地实现最优轨迹规划以及实现多种最优算法的统一是未来研究中亟需解决的问题。而如何将焊接电流、电压、摆弧、熔滴过渡等焊接工艺参数同焊接机器人空间轨迹规划有机地统一结合起来,通过离线编程实现空间轨迹和工艺

参数的联合规划,则是今后焊接机器人轨迹规划领域的重点和难点研究方向,对进一步提高焊接效率,改善焊接质量具有重要的现实意义。

### 参考文献:

- [1] 朱进满. 焊接机器人的应用[J]. 现代制造, 2005(12): 42-47.
- [2] 张凯, 刘成良, 付庄, 等. 6R 机器人轨迹规划及其在焊接中的应用[J]. 机械设计, 2002, 19(10): 20-23.
- [3] 李天友, 孟正大, 赵娇娇, 等. 基于焊接机器人的关节空间轨迹规划方法[J]. 电焊机, 2009, 39(4): 47-50.
- [4] 李天友. 弧焊机器人动态轨迹规划方法的研究与实现[D]. 东南大学, 2010: 1-2.
- [5] 叶伯生. 机器人空间三点圆弧功能的实现[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 5-8.
- [6] 邓勇. B 样条曲线的实时插补[J]. 机械与电子, 2001, 1(4): 23-24.
- [7] KAHN M E, ROTH B. The near-minimum-time control of open loop articulated kinematics chains [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 93(3): 164-172.
- [8] BAZAZ S A, TONDU B. Online computing of a robotic manipulator joint trajectory with velocity and acceleration constraints [C]//Proceeding of 1997 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning. Marina del Rey, CA: IEEE, 1997: 1-6.
- [9] BEAZEL V, RED E. Inaccuracy compensation and piecewise circular approximation of parameter paths[J]. Robotics, 1993, 11(5): 413-425.
- [10] 周凤余, 杨福广, 刘明, 等. 基于插补算法的大型喷浆机器人轨迹规划[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2003, 22(2): 66-68.
- [11] 刘晓平, 田西勇, 庄未. 基于非对称组合正弦函数的机器人规划方法[J]. 电子机械工程, 2008, 24(1): 56-58.
- [12] ABDEL-MALEK K, YEH H J. Path trajectory verification for robot manipulators in a manufacturing environment [J]. Journal of Engineering Manufacture, 1997, 211(7): 547-555.
- [13] WURLL C, HENRICH D. Point-to-point and multi-goal path planning for industrial robots[J]. Journal of Robotic Systems, 2001, 18(8): 445-461.
- [14] PACHIDIS T P, LYGOURAS J N. Vision-based path generation method for a robot-based arc welding system[J]. Journal Intelligent and Robot System, 2007, 48(3): 307-331.
- [15] 张珂, 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.
- [16] 周律, 陈善本, 林涛, 等. 基于局部视觉的弧焊机器人自主焊缝轨迹规划[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 49-52.
- [17] 汪苏, 蔡玲玲, 苗新刚, 等. 骑座式相贯线焊缝焊接机器人连续轨迹规划[J]. 焊接技术, 2010, 39(7): 44-47.
- [18] CHEN Changliang, HU Shengsun, HE Donglin, et al. An approach to the path planning of tube-sphere intersection welds with the robot dedicated to J-groove joints[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(4): 41-48.
- [19] 王天琪, 李亮玉, 岳建锋, 等. 石油平台 T 型导管架焊接机器人多层多道焊路径规划[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(增刊 I): 155-159.
- [20] 陈鲁刚, 平雪良, 徐稀文, 等. 基于 ADAMS 的焊接机器人轨迹规划[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2011, 10(2): 196-200.
- [21] 曾翠华, 张纯忠, 杨军. 基于弗莱纳-雪列空间矢量的焊接离线编程路径规划[J]. 焊接技术, 2011, 40(7): 44-48.
- [22] 王晓峰. 弧焊机器人焊接姿态与焊接工艺参数联合规划[D]. 南昌: 南昌航空工业学院, 2006: 10-12.
- [23] 刘好明. 6R 关节型机器人轨迹规划算法研究及仿真[D]. 淄博: 山东理工大学, 2008: 4-6.
- [24] 张红强. 工业机器人时间最优轨迹规划[D]. 长沙: 湖南大学, 2004: 9-10.
- [25] GOLDBERG D E, RICHARDSON J. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization[C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1987: 41-49.
- [26] WANG C N, SOH Y C, WANG H, et al. A hierarchical genetic algorithm for path planning in a static environment with obstacles[J]. Electrical and Computer Engineering, 2002(3): 22-29.
- [27] 张敏, 石秀华, 吴一红. 基于 ADAMS 的三自由度水下机械手运动学仿真[J]. 机械设计与制造, 2005(7): 186-190.
- [28] 张敏, 石秀华, 杜向党, 等. 三自由度机械手运动学分析[J]. 机械与电子, 2005(1): 89-93.
- [29] 晏祖根, 王瑞泽, 孙智慧, 等. 四自由度并联机器人运动学分析[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(2): 34-36.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

## 台达自动化方案亮相 2015 国际包装展

2015 年 3 月 9-11 日, 台达将携最新的包装行业解决方案出席在广州的中国进出口商品交易会展馆举办的“第二十二届中国国际包装工业展览会”, 借助这一平台为国际、国内包装行业带来新的认识和无限商机。台达多年来深耕包装行业, 积累了丰富的行业知识和经验, 拥有成熟的技术以及产品优势, 特别是一些有特色的解决方案深受客户欢迎。

在本次展会上, 台达将以动静结合的方式全方位展示在包装行业和控制技术领域的最新成果, 充分展现台达控制产品卓越的通信能力和整合能力。展示方案包括:

- 1) 食品饮料液体灌装机。实现同步液体灌装, 精确流量控制, 提高生产效率。
  - 2) 自动单卷包装机。全伺服控制设备, 具备稳定、精准、易维护、磨损少、寿命长等特点。
  - 3) 高端工业机械解决方案。轻松构建高端机械解决方案架构, 节省配线与通信模块成本。
  - 4) 枕式包装机整体解决方案。可快速检测包装缺陷, 自动计算包装数量, 大幅提升包装设备的高速高精性能。
- 同期展出的还有高速视觉动态演示系统、飞剪追剪演示系统, 以彰显台达在行业内的实力与创新力。

(王亮)