

文章编号:1001-2354(2002)10-0020-04

# 6R 机器人轨迹规划及其在焊接中的应用\*

张凯,刘成良,付庄,曹其新,殷跃红

(上海交通大学 机械工程学院,上海 200030)

**摘要:**分析了关节坐标空间和直角坐标空间轨迹规划的特点,给出了轨迹规划的仿真算法,并进行了仿真分析。针对 IVECO 横梁的焊接,进行了机器人的轨迹规划。规划轨迹平滑连续,无抖动与停顿,可以保证机器人正常工作。规划结果表明所采用的方法是正确的。

**关键词:**机器人;轨迹规划;仿真

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A

## 1 引言

机器人轨迹规划是使机器人在规定时间内,按一定的速度及加速度,从初始状态移动到某个规定的目标状态。轨迹规划涉及 3 个问题,首先是任务描述,主要是对末端执行机构的运动路径和轨迹进行确定;其次是利用计算机语言描述所确定的轨迹;最后是实时计算,即根据位置、速度及加速度生成运动轨迹。轨迹规划可以在关节空间中进行,也可以在直角坐标空间进行。在关节空间中进行轨迹规划时,将关节变量表示为时间的函数,用其一、二阶导数描述机器人的运动。在直角坐标空间中进行轨迹规划时,机器人末端执行器在直角坐标空间作某种定义的函数轨迹的规划,它将手爪位姿、速度、加速度表示为时间的函数,而相应的关节位置、速度及加速度由手爪信息导出。由于关节的驱动,须将空间约束转换到关节,用某一函数描述产生一参数化轨迹以满足关约束,并尽量逼近空间路径。在分析这两种方法的基础上,就实际焊接机器人的轨迹规划进行了研究。针对 IVECO 横梁的焊接,进行了机器人的轨迹规划。规划轨迹平滑连续,无抖动与停顿,可以保证机器人正常工作。

## 2 轨迹规划方法

### 2.1 关节空间法

首先用逆运动学将路径点转换成关节矢量角度值,然后对每个关节拟合一光滑函数,从初始点依次通过所有路径点到达目标点,并使每一路径各关节运动时间均相同。关节轨迹同时要满足一组约束条件,如

位姿、速度、加速度与连续性等。在满足约束条件下,可选取不同类型的关节插值函数。常用的插值函数有:三次多项式插值、高阶多项式插值及用抛物线过渡的线性插值等。各关节函数之间是相互独立的,且不会发生机构的奇异性问题。

#### 2.1.1 无中间点的 PTP 运动

无中间点的 PTP 运动指机器人的手部运动时,由机器人起点某位姿运动到终点另一位姿时,手部不经过任何中间位姿点的运动。设机器人的起始位姿为  $T_6^0$ ,此时位姿的几个关节角度为  $q_i^0 (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。经过时间  $t_f$  后,机器人手部不经任何其它的中间点直接到达目标位姿  $T_6^1$ ,相应的关节位置为  $q_i^1 (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。为了使机器人的运动快速协调,须找出光滑函数  $q_i(t)$ 。

如三次多项式插值:

$$q_i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

关节运动从静止起点开始运动到终点静止结束,4 个系数可由起始点和终止点的约束条件求得。

#### 2.1.2 带中间点的 PTP 运动

一般情况下,机器人的运动要经过一些中间点,并希望机器人能够平稳地通过中间点,以便机器人迅速到达目标位置。设机器人由起始位姿  $T_6^0$ ,经过中间点  $T_6^1, T_6^2, \dots, T_6^{m-1}$ ,最后到达终止点  $T_6^m$ ,其各位姿点的关节角度为  $q_i^0, q_i^1, q_i^2, \dots, q_i^m (i = 1, 2, \dots, 6)$ ,每一段运动的时间间隔为  $t_1, t_2, \dots, t_m$ 。如果每一段都用一个三次多项式表示,则:

$$q_i^j(t) = a_{i0}^j + a_{i1}^j t + a_{i2}^j t^2 + a_{i3}^j t^3$$

$$(i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, m; 0 < t < t_j)$$

为了方便,每一段时间从零开始计算,上述共  $4m$  个方程,每个方程有 4 个系数,共计  $4m$  个系数,系数可由中间点的速度、加速度、连续性及起始点和终止点

\* 收稿日期:2001-10-09;修订日期:2002-03-28

作者简介:张凯(1965-),男,山东泰安人,副教授,上海交通大学机械工程学院博士生,主要研究方向:机械加工工艺理论、机器人应用、机械装备自动化及精密加工控制等。

的约束条件求得。

### 2.2 直角坐标空间法

对于电弧焊、电切割等加工,不仅要求机器人在运动终点准确定位,而且要求运动轨迹具有一定的精度,即要求对手臂进行连续轨迹(Continuous Path)控制。即使是搬运、上下料,也要求有一准备动作,以保证可靠的抓取与卸除,因此需要增加逼近与脱离两个位姿。同时为避免多余的抖动与停顿,常常也要求执行器在经过这些空间点时运动是连续的。

CP 运动方式有空间直线运动、空间圆弧运动及空间椭圆运动等运动方式。

#### 2.2.1 空间直线运动

此时机器人只需在运动中完成一条空间直线轨迹,其轨迹控制采用在直角坐标空间里的直线插补方式。只要给出直角坐标空间内轨迹起点和终点的位姿信息,即可计算出由两点所确定的直线段上的一系列点的位姿信息。这一系列点的位姿经过运动学反解,即可求得各个关节对应点所需要的关节角度。

#### 2.2.2 空间圆弧运动

三维空间轨迹除了简单的直线、圆弧、椭圆,还包括抛物线、双曲线、螺旋线等复杂的曲线。设机器人由起始点位姿  $T_0^0$  经过中间某一点  $T_1^1$  后到达终止点  $T_2^2$ 。在固定坐标系  $X、Y、Z$  方向上,起始点位置为  $p^0 = (p_x^0, p_y^0, p_z^0)^T$ ,姿态角为  $\theta_0、\phi_0、\psi_0$ ,中间点的位置为  $p^1 = (p_x^1, p_y^1, p_z^1)^T$ ,姿态角为  $\theta_1、\phi_1、\psi_1$ ,终止点的位置为  $p^2 = (p_x^2, p_y^2, p_z^2)^T$ ,姿态角为  $\theta_2、\phi_2、\psi_2$ 。

如果根据空间圆方程:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2$$

对上式进行轨迹规划,编写轨迹的参数方程十分困难,对上述方程进行插补也是非常复杂的。为了便于计算圆的轨迹方程,必须先将圆的轨迹方程由固定坐标系进行变换,然后在新坐标系中引入轨迹规划插值后,再反变换到基准坐标系中,其轨迹规划的步骤如图 1 所示。

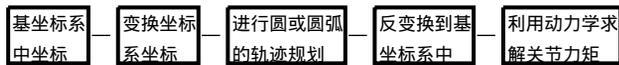


图 1 机器人圆弧运动轨迹规划步骤

#### 2.2.3 空间椭圆运动

焊接机器人的椭圆运动方式与圆弧运动方式相似,不同之处在于是以椭圆进行规划的。根据轨迹上的任意三个点,并给出长短轴比例  $k = a/b$ ,即可进行椭圆的轨迹规划。当  $a = b$  时,椭圆的轨迹规划即为圆的轨迹规划。

## 3 轨迹规划仿真算法

机器人的轨迹规划主要有两种方案,一种是基于关节坐标空间的,另一种是基于直角坐标空间的。根据其不同特点,用于不同运动的轨迹规划。对于点位运动(PTP),给出的是起始点和目标点,而不考虑两点之间的移动路径,用基于关节空间方案来进行轨迹规划。机器人的 PTP 运动必须满足起始点、中间点和终止点的位置速度、加速度及连续性要求,以达到各段轨迹平滑。仿真算法框图如图 2 所示。

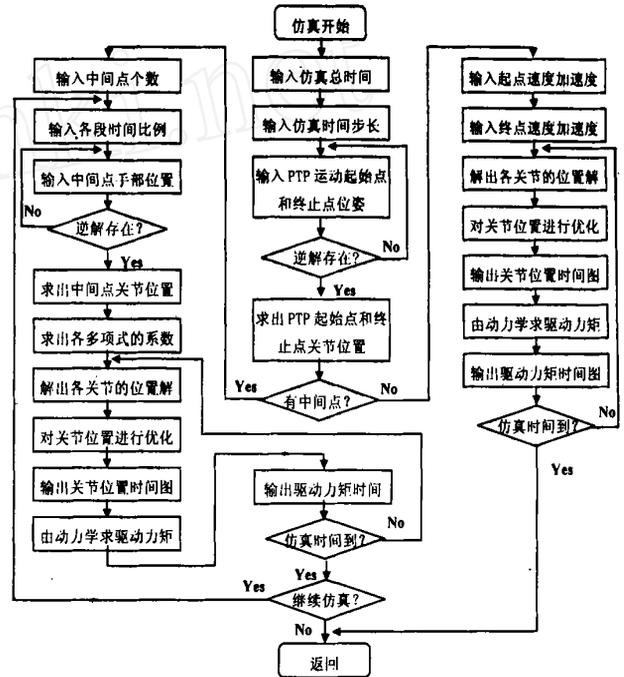


图 2 机器人 PTP 运动轨迹规划算法框图

对于连续运动轨迹(Continuous Path),不仅要求机器人达到目标点,而且必须沿着所希望的路径在一定的精度范围内移动,故采用直角坐标空间来规划机器人运动轨迹。采用这种方法时,手部运动的轨迹是以手部在直角坐标系中的位置和姿态对时间  $t$  的函数来描述的。设机器人完成 CP 运动所需的时间为  $T$ ,时间步长为  $\Delta t$ ,那么运动共分为  $L = T/\Delta t$  段。在  $t_i$  时刻  $(t_i = i \cdot \Delta t, i = 1, 2, \dots, L)$ ,先根据连续轨迹方程计算出机器人手部在直角坐标系中的位置和姿态,再进行运动学逆问题的计算,以求出期望的关节转角和关节角增量,然后利用动力学问题求解关节期望的驱动力矩。整个过程共需进行  $L$  次运动学逆问题和动力学逆问题求解,计算量非常庞大。如果轨迹方程是以时间  $t$  为参数的参数方程形式给出的,那么轨迹规划就比较简单方便。

## 4 轨迹规划仿真分析

根据轨迹规划仿真算法,就可以进行机器人轨迹规划仿真,确定机器人关节位置、驱动力矩等参数。同

时根据仿真结果是否产生关节力矩突变,确定是否对关节初值进行修改。

4.1 有中间点的 PTP 运动轨迹规划仿真

设经过一个中间点,前半段仿真时间为 3 s,后半段为 2 s,步长  $t = 0.01$  s。

- 起始点:位置  $P = (0.3, 0.5, 1.6)$ ;  
姿态角  $A = 30^\circ, O = 40^\circ, T = 50^\circ$ ;
- 中间点:位置  $P = (0.4, -0.6, 1.8)$ ;  
姿态角  $A = 23^\circ, O = 45^\circ, T = 65^\circ$ ;
- 目标点:位置  $P = (-0.5, -0.3, 1.67)$ ;  
姿态角  $A = -30^\circ, O = -20^\circ, T = 45^\circ$ 。

机器人关节位置和驱动力矩时序分别如图 3、图 4 所示。

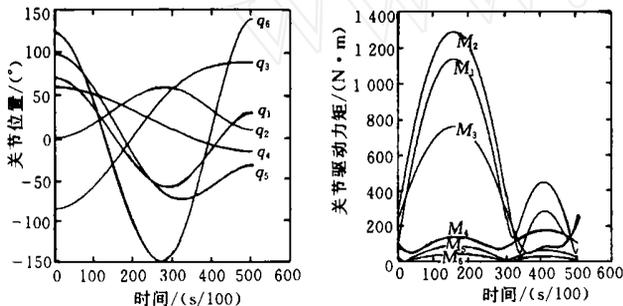


图 3 关节位置时序图      图 4 关节驱动力矩时序图

4.2 空间直线 CP 运动轨迹规划仿真

运动总仿真时间  $T = 5$  s,仿真时间步长  $t = 0.01$  s。

- 起始点:位置  $P = (0.5, 0.4, 1.7)$ ;  
姿态角  $A = 30^\circ, O = 50^\circ, T = 60^\circ$ ;
- 终止点:位置  $P = (0.3, -0.7, 1.9)$ ;  
姿态角  $A = 20^\circ, O = -30^\circ, T = 50^\circ$ 。

关节初值  $q = (-130.02, -2.95, 70.594, 72.93, -81.23, -68.48)$ ,关节位置时序如图 5 所示,关节驱动力矩如图 6 所示。仿真结果表明关节运动包含突变,故需要对关节初值进行修改。

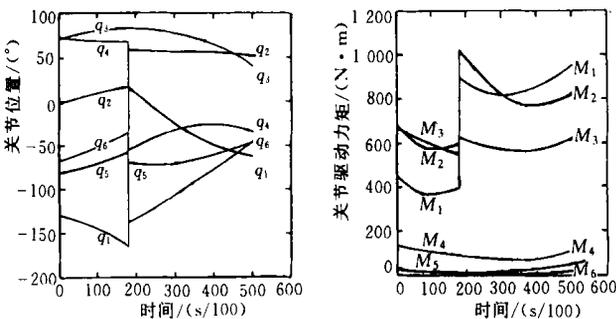


图 5 关节位置时序图      图 6 关节驱动力矩时序图

5 机器人轨迹规划实例

IVECO 车架第三横梁的结构如图 7 所示,其总成由左端盖、横梁立体和支架组成,相互之间以焊接成

形。图 8 为横梁焊接位置图,首先焊接端盖与横梁立体之间的左右两条内环缝。此时焊枪不动,夹具带动横梁转动  $360^\circ$ 。然后工作台回转  $180^\circ$ ,焊枪在机器人带动下也回转  $180^\circ$ ,焊接左右两条外环缝及支架。为完成焊接任务,机器人需按照图 9 所示焊接路径点移动。其中  $a$  点是机器人的零位,即初始位置。 $b$  点左内环缝焊接,  $c$  点左内环缝焊接完毕,  $d$  点右内环缝焊接,  $e$  点右内环缝焊接完毕,  $f$  点点焊支架。由于支架的抓取是靠电磁吸力,为了防止焊接放出的热量传递给线圈,而把线圈烧坏,先点焊支架,待焊缝凝固后手爪便离开,这样由于热量少、时间短,不会影响线圈性能。从  $f$  点过  $g$  点到  $h$  点开始对左外环缝焊接,  $h, h, h$  是左外环缝,焊枪走圆的轨迹,  $i$  点离开左外环缝,从  $i$  点过  $j$  点到  $k$  点开始对右外环缝焊接,  $k, k, k$  是右外环缝,焊枪走的也是圆的轨迹,  $l$  点离开右外环缝,  $m$  点开始对支架右边缝焊接;  $m, n, o$  支架右边缝,  $o$  点焊接停止,  $p$  点离开支架右边缝到  $q$  点  $m$  点开始对支架左边缝焊接。  $q, r, s$  支架左边缝,  $s$  点焊接停止,  $t$  离开支架左边缝到  $u$  点,开始下一个循环。为减少积累误差,每循环 5 次焊枪回零位一次。

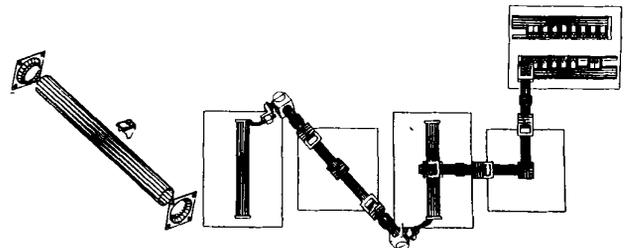


图 7 横梁的结构      图 8 横梁焊接位置图  
焊接机器人(图 8 左侧机器人)的轨迹规划,如图 10 所示。

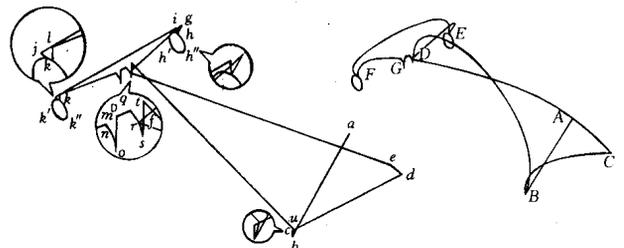


图 9 机器人焊接路径点      图 10 机器人轨迹规划

6 结语

在分析关节坐标空间和直角坐标空间轨迹规划特点的基础上,给出了相应的轨迹规划仿真算法。在此基础上,针对 IVECO 横梁的焊接,进行了机器人的轨迹规划。从规划结果可以看出,规划轨迹平滑连续,无抖动与停顿,可以保证机器人正常工作。该研究已成功应用于 IVECO 横梁焊接系统。

文章编号:1001-2354(2002)10-0023-03

# 球形容器的 CAD/CAPP 集成系统的开发研究\*

贺元成, 郑国君, 柳忠彬

(四川轻化工学院 机电工程系, 四川 自贡 643033)

**摘要:** 针对球形容器的设计和制造特点, 结合数据库技术、参数化设计和图形处理技术, 介绍了球形容器的 CAD/CAPP 集成系统的总体结构和各功能模块的实现方案及开发环境, 提出了借助 Visual C++、Power Builder 和 AutoCAD 等软件开发基于产品数据管理的 CAD/CAPP 集成系统的新思路。

**关键词:** 球形容器的设计; 产品数据管理; CAD; CAPP

**中图分类号:** TQ053.2; TP391.72 **文献标识码:** A

## 1 引言

球形容器的设计和制造属于单件、小批量生产。由于涉及的理论知识较广, 使球形容器的设计繁杂、工作量大和周期长。而球形容器的设计与制造又有其独特的特点: 产品的结构具有很大的相似性, 主要是基于变型设计; 产品的制造工艺也具有很大的相似性, 制造过程属于过程卡作业。因此, 为提高球形容器的设计质量、设计效率, 缩短设计周期, 以《钢制球形储罐》(GB12337—1998)、《球形储罐施工及验收规范》(GBJ94—1986) 等规范为基础, 借助网络和统一数据库管理技术, 开发球形容器的 CAD/CAPP 集成系统。

## 2 系统总体结构

目前 CAD、CAPP 系统的集成方式主要有两种途径, 一是通过数据交换, 如开发专用接口文件或采用数据交换标准 (如 IGES、DFX、STEP 等) 来实现以有不同 CAD、CAPP 系统间的集成; 二是开发集成的 CAD/CAPP 系统, 通过统一的产品信息模型和数据库管理系统, 实现不同应用间的无缝连接。

根据球形容器的设计和制造特点, 球形容器的 CAD/CAPP 系统包括设计计算、球片展开、工程图绘制、制造工艺及工程图档管理等子系统。整个系统按模块结构组织, 由产品数据管理模块控制并连接各功能子系统, 实现各子系统的信息集成、功能集成和过程集成。各子系统之间既相互独立又有一定的联系, 它们之间由产品数据管理模块控制接口进行数据传输。同时, 系统所生成的产品数据通过数据接口可直接与企业的 MRP 系统和 MIS 系统连接, 实现信息共享与交流。总体结构如图 1 所示, 其中虚框内为 CAD/CAPP 集成系统。

### 参考文献

- [1] Ishihara, Koichi. Now and future of laser welding robots - application in automotive industry[J]. Robot, 1997, 114(1): 42-48.
- [2] Yamaoka, Naoji, Kouji. On-line car-body measuring system using modified car-body welding robot[J]. Robot, 1997, 114(1): 77-81.
- [3] Harwig, Dennis D. Weld parameter development for robot welding (A). Technical Paper - Society of Manufacturing, RP Proceedings of the 1996 Manufacturing Conference [C]. Dearborn MI USA, 1996: 96-291.

Track planning of 6R robot and its application to welding  
ZHANG Kai, LIU Cheng-liang, FU Zhuang, CAO Qi-xin,

### YIN Yue-hong

(Mechanical Engineering Institute of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The characteristics of track planning in joint coordinates space and Cartesian coordinates space were analyzed. The simulation algorithm of track planning was presented and the simulation analysis was conducted. Aiming at the welding of IVECO automobile crossbeam, the track planning of robot was carried out. The planned track is smooth and continuous without any dithering and halt, thus normal job of robot may be ensured. The result of planning demonstrates that the adopted method is correct.

**Key words:** Robot; Track planning; Simulation

Fig 10 Tab 0 Ref 3

"Jixie Sheji" 1637

\* 收稿日期: 2001-08-27; 修订日期: 2002-03-26

基金项目: 四川省应用基础研究基金资助项目 (99(2)-331)

作者简介: 贺元成 (1965-), 男, 四川广安人, 教授, 硕士, 主要研究方向: 机械工程、CAD/CAM/CAPP/ERP。