

文章编号: 1001-0920(2005)12-1374-05

## 平面复杂边缘的双机器人协调跟踪运动规划研究

陈国良, 黄心汉, 王 敏

(华中科技大学 控制科学与工程系, 武汉 430074)

**摘 要:** 研究双机器人协调跟踪平面复杂边缘所涉及的问题。在笛卡儿空间内对跟踪任务进行协调分解, 并分析双机器人的位置约束关系, 采用双曲线函数规划双机器人基于关节空间的运动轨迹, 以满足位置、速度以及加速度等平滑运动的约束条件, 采用基于曲线极大值的分段跟踪算法扩展平面复杂曲线的一般性。仿真实验和应用均表明了所研究内容的可行性和正确性。

**关键词:** 双机器人协调; 复杂边缘跟踪; 运动规划; 双曲线轨迹

**中图分类号:** TP242      **文献标识码:** A

## Motion Planning of Coordinated Tracking Complex Plane Edge for Dual-robot

CHEN Guo-liang, HUANG Xin-han, WANG Min

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: CHEN Guo-liang, E-mail: ch2103103@163.com)

**Abstract:** The motion planning for planar complex edge tracking with two coordinated robots is discussed. A tactic to coordinately distribute the tracking tasks to each robot is proposed, and the relation of positional constraint between two robots is analyzed in Cartesian space. Hyperbolic function is employed to plan robot trajectories in joint space to meet the requirements of smooth displacements, speed, acceleration and jerk etc. A piecewise tracking algorithm based on the maximum value of edge is proposed to extend the universality of tracked edge. Simulation experiments show the motion planning is feasible and correct.

**Key words:** Dual-robot coordination; Complex edge tracking; Motion planning; Hyperbolic trajectories

### 1 引 言

多机器人协调作业的研究已成为机器人研究领域中的重要且具有活力的一个分支<sup>[1]</sup>。目前, 对一些执行简单搬运或装配操作的多机器人协调运动规划问题的研究已经很完善<sup>[2]</sup>, 但对于具有复杂运动和高精度要求的作业, 诸如汽车车门、挡风玻璃涂胶, 复杂焊缝跟踪等复杂边缘的跟踪任务, 无论是规划还是控制, 尚没有较成熟完善的理论与技术方法<sup>[3]</sup>。

双机器人协调跟踪复杂边缘的运动规划包括两个基本问题: 一是跟踪任务的双机器人协调任务分解, 另一个是双机器人运动的协调规划。文献[2]提出一种通过二维图像代替工件复杂边缘的空间表

示, 利用双机器人协调跟踪复杂边缘的规划方法, 该方法简单有效, 但缺乏通用性; 文献[3]系统地研究了双机器人协调跟踪空间复杂边缘的运动规划问题, 给出了一类双机器人协调作业的运动约束关系, 进行了笛卡儿空间的运动规划, 但该方法在边缘类型的适用性上具有一定的局限性。

针对一般性机器人和作业任务, 本文以平面复杂边缘跟踪任务为对象, 对双机器人协调跟踪复杂边缘任务的运动规划问题进行了研究。

### 2 协调规划

假设被跟踪物体的边缘是已知的, 即已知其方

收稿日期: 2004-12-17; 修回日期: 2005-03-17

基金项目: 国家 863 计划项目(2004AA 844120); 国家自然科学基金项目(60275013)。

作者简介: 陈国良(1972-), 男, 湖南宁乡人, 博士生, 从事微操作机器人、智能控制等研究; 黄心汉(1946-), 男, 湖北咸宁人, 教授, 博士生导师, 从事多传感器信息融合、机器人等研究。

程 双机器人跟踪复杂边缘任务是指: 通过一些约束前提, 建立两个机器人之间的约束关系, 推导出机器人的工具末端在空间坐标系中的位置; 然后传送给各个机器人, 并通过各种反馈信号对轨迹进行调整, 实现对复杂边缘轨迹的跟踪

### 2.1 任务的协调分配

边缘跟踪任务由两个机器人协调完成, 首先需要对两个机器人进行基于任务的协调分配 以文献 [3] 为基础, 对平面复杂边缘的双机器人协调跟踪进行任务协调分解 假定两个机器人分别是 Robot1 和 Robot2 规定 Robot1 夹持工件沿 Y 轴方向移动, Robot2 对工件边缘进行跟踪 图 1 描述了双机器人协调系统, 图中  $\{W_o\}$  为系统的参考坐标系, 并规定  $\{W_o\}$  的 O-X Y 平面平行于工件的边缘所在的平面  $M_1$ .

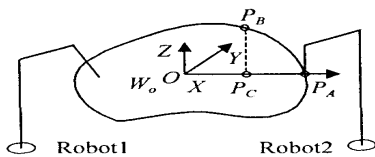


图 1 协调系统任务描述

跟踪过程中, Robot1 沿 Y 轴方向来回移动, Robot2 的工具末端始终在 X 轴运动 设在  $t = t_0$  时, 工件的边缘与 Robot2 的工具末端在 X 轴的交点为  $P_A$ . 经过  $\Delta t$  时间后, 工件沿 Y 轴方向运动了  $\Delta Y$ , 设此时工件的边缘与 X 轴的交点为  $P_C$ , 为了跟踪工件, Robot2 的工具末端也应运动到  $P_C$ . 假定  $P_C$  点在  $t_0$  时刻对应的空间点为  $P_B$ . 当  $\Delta Y$  足够小时, Robot2 在 X 轴上运动的  $P_A P_C$  段即是对工件  $P_A P_B$  段边缘的跟踪 以此继续, 可以完成对整个工件边缘的跟踪

### 2.2 坐标变换

可知  $\{W_o\}$  是固定坐标系 在跟踪的初始时刻, 利用工件边缘所在平面上任意不在同一直线上的 3 点  $P_i(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3$ , 可以确定该坐标系 以  $P_2$  点为原点建立  $\{W_o\}$ . 平面  $M_1$  法矢量的方向数为  $l = (y_1 - y_3)(z_2 - z_3) - (y_2 - y_3)(z_1 - z_3)$ ,  $m = (x_2 - x_3)(z_2 - z_3) - (x_1 - x_3)(z_2 - z_3)$ ,  $n = (x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3)$ , 则  $\{W_o\}$  的 Z 轴方向余弦等于

$$\alpha_x = \frac{l}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}},$$

$$\alpha_y = \frac{m}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}},$$

$$\alpha_z = \frac{n}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}$$

规定  $\{W_o\}$  的 X 轴方向为  $P_1 P_2$  矢量方向, X 轴方向余弦为

$$n_x = \frac{(x_1 - x_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}},$$

$$n_y = \frac{(y_1 - y_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}},$$

$$n_z = \frac{(z_1 - z_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}}$$

由 Z 轴和 X 轴可确定  $\{W_o\}$  的 Y 轴, 其方向余弦为

$$\alpha_x = \alpha_y \times n_z - \alpha_z \times n_y,$$

$$\alpha_y = \alpha_z \times n_x - \alpha_x \times n_z,$$

$$\alpha_z = \alpha_x \times n_y - \alpha_y \times n_x.$$

$\{W_o\}$  相对参考坐标系的齐次坐标变换矩阵  ${}^o T$  为

$${}^o T = \begin{bmatrix} n_x & \alpha_x & \alpha_x & x_2 \\ n_y & \alpha_y & \alpha_y & y_2 \\ n_z & \alpha_z & \alpha_z & z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & P_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

### 2.3 位置约束

图 2 为工件及两个机器人 ( $i = 1$  代表 Robot1,  $i = 2$  代表 Robot2) 之间的坐标系关系示意 图中定义的坐标系和相对变换分别为:  $O_{ref}$  代表参考坐标系;  $O_{B_i}$  代表机器人  $i$  的基坐标系;  $O_{obj}$  代表  $t = 0$  时刻的工件坐标系, 规定为固定坐标系, 即  $\{W_o\}$ ;  ${}^B_i T$  代表机器人  $i$  的基坐标系相对于参考坐标系的齐次变换矩阵;  ${}^i B_i T$  代表机器人  $i$  的工具相对于其自身机器人基坐标系的齐次变换矩阵;  ${}^o T$  代表  $t = 0$  时刻的工件坐标系相对于参考坐标系的齐次变换矩阵, 见式 (1);  ${}^i T$  代表机器人工具相对于工件坐标系的齐次变换矩阵

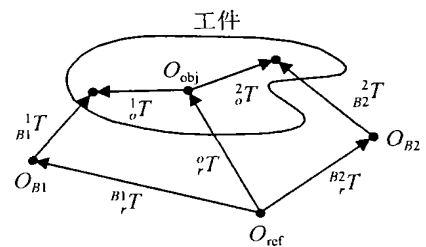


图 2 坐标系相互关系示意

由任务协调分解可知, Robot1 的工具和 Robot2 的工具总是分别在  $\{O_{obj}\}$  内沿着 Y 轴和 X 轴移动, 因此  ${}^i T$  是时变矩阵 由图 2 有

$${}^B_i T {}^i B_i T = {}^o T {}^i T, \quad (2)$$

进一步有

$${}^i B_i T = {}^B_i T^{-1} {}^o T {}^i T. \quad (3)$$

假定 Robot1 和 Robot2 的工具在从  $t$  到  $t + \Delta t$  的时间内在  $\{O_{obj}\}$  内的运动增量分别为  $\Delta Y$  和  $\Delta X$ ,

则机器人的工具坐标系相对于 $\{O_{obj}\}$ 的变换为

$${}^oT \text{rans}(\Delta P_i(t)),$$

式中

$$\Delta P_1(t) = (0, \Delta Y, 0)^T, \Delta P_2(t) = (\Delta X, 0, 0)^T.$$

在 $t + \Delta t$ 时刻,机器人的工具坐标系相对于 $\{O_{obj}\}$ 的齐次坐标变换矩阵为

$${}^i T(t + \Delta t) = {}^o T \text{rans}(\Delta P_i(t)) {}^i T(t). \quad (4)$$

联立式(3)和式(4),可得 $t + \Delta t$ 时刻机器人的工具相对于其自身机器人基坐标系的齐次坐标变换矩阵为

$${}^i B T(t + \Delta t) = {}^B i T^{-1} {}^o T {}^i T(t + \Delta t). \quad (5)$$

若 $\Delta {}^i B T(t)$ 为从 $t$ 到 $t + \Delta t$ 的时间内机器人工具在其自身坐标系内的姿态和位置运动增量,则由文献[4]有

$$\Delta {}^i B T(t) = {}^i B T(t)^{-1} {}^i B T(t + \Delta t) - I,$$

式中 $I$ 为 $4 \times 4$ 的单位矩阵.进一步推导有

$$\Delta {}^i B T(t) = {}^i B T(t)^{-1} {}^B i T^{-1} {}^o T {}^i T(t) - I. \quad (6)$$

以 $\theta(t)$ 表示机器人 $i$ 的关节向量, $\Delta \theta(t)$ 表示机器人 $i$ 微分增量 $\Delta {}^i B T(t)$ 所对应的关节增量 $\Delta \theta(t)$ 可通过机器人 $i$ 的雅克比矩阵 $J(\theta)$ 建立如下关系:

$$\Delta \theta(t) = J(\theta)^{-1} \Delta {}^i B T(t). \quad (7)$$

如果 $\theta(t)$ 和 $\Delta {}^i B T(t)$ 已知,通过式(7)求解一系列代数方程,可以求出 $\Delta \theta(t)$ . $t + \Delta t$ 时刻对应的机器人关节向量为

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \Delta \theta(t). \quad (8)$$

## 2.4 轨迹规划

以 $\Delta t$ 跟踪周期,在关节空间内,对Robot1和Robot2进行轨迹规划.任意 $t_0$ 时刻后的一个周期内,机器人的关节轨迹除了需要满足位移条件 $\Delta \theta(t_0) = \theta(t_0 + \Delta t) - \theta(t_0)$ ,还应满足以下平滑约束条件:

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t_0) = \dot{\theta}(t_0 + \Delta t) = 0, \\ \ddot{\theta}(t_0) = \ddot{\theta}(t_0 + \Delta t) = 0, \\ \dddot{\theta}(t_0) = \dddot{\theta}(t_0 + \Delta t) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

对机器人进行关节空间内的轨迹规划,采用双曲线函数<sup>[5]</sup>

$$s(x) = \{1 + \exp[-\alpha(x - \alpha)/b]\}^{-1}. \quad (10)$$

上式描述的函数,当其自变量 $x$ 从 $-$ 变化到 $+$ 时,函数值从0变到1;自变量 $x$ 在变化区间 $[a - b, a + b]$ 变化时,函数值将从 $d$ 变化到 $1 - d$ ,则有 $\alpha = \ln[(1 - d)/d]$ .通过改变 $a, b$ 和 $d$ 值可得到函数的不同变化曲线

将式(10)中自变量 $x$ 的变化范围从 $[-$ ,  $+$ ]对应到 $[0, 1]$ 以适应轨迹规划的要求,构造函数

$$x(\tau) = \frac{1}{1 - \tau} - \frac{1}{\tau}. \quad (11)$$

进一步令 $\tau = t/\Delta t$ , $\tau$ 从0到1的变化对应于时间间隔 $[0, \Delta t]$ .联立(10)和(11)可以得到关于时间 $t$ 的双曲线函数

$$s(\tau) = s(x(\tau)). \quad (12)$$

式(12)的一阶、二阶、三阶导数分别为

$$\dot{s}(\tau) = \frac{\alpha}{b} s(1 - s)x', \quad (13)$$

$$x' = \frac{dx}{d\tau} = \frac{1}{(1 - \tau)^2} + \frac{1}{\tau^2};$$

$$\ddot{s}(\tau) = \frac{\alpha}{b} [(1 - 2s)sx'' + s(1 - s)x'], \quad (14)$$

$$x'' = \frac{d^2x}{d\tau^2} = 2 \left[ \frac{1}{(1 - \tau)^3} - \frac{1}{\tau^3} \right];$$

$$\dddot{s}(\tau) = \frac{\alpha}{b} [(1 - 2s)sx''' - 2s^2x'' + s(1 - s)x''], \quad (15)$$

$$x''' = \frac{d^3x}{d\tau^3} = 6 \left[ \frac{1}{(1 - \tau)^4} + \frac{1}{\tau^4} \right].$$

可以证明,式(13)~(15)在 $\tau = 0$ 和 $\tau = 1$ 函数值为零.事实上,式(12)的高阶导数在 $\tau = 0$ 和 $\tau = 1$ 的值亦为零.因此机器人关节采用式(12)形式的轨迹将满足位移条件 $\Delta \theta(t_0) = \theta(t_0 + \Delta t) - \theta(t_0)$ 和式(9)规定的平滑约束条件.利用式(12)规划 $t_0$ 时刻后,一个周期内的机器人关节轨迹为

$$\theta(t + t_0) = \theta(t_0) + [\theta(t_0 + \Delta t) - \theta(t_0)]s(t/\Delta t). \quad (16)$$

根据式(16),可得机器人的关节速度和加速度分别为

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t + t_0) = [\theta(t_0 + \Delta t) - \theta(t_0)]\dot{s}_i(t/\Delta t)/\Delta t, \\ \ddot{\theta}(t + t_0) = [\theta(t_0 + \Delta t) - \theta(t_0)]\ddot{s}_i(t/\Delta t)/\Delta t^2. \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\dot{s}_i(t/\Delta t)$ 和 $\ddot{s}_i(t/\Delta t)$ 分别由式(13)和(14)给出

跟踪任务的协调分解方法实质上是对工件边缘进行直线逼近,该方法可精确地跟踪目标点的位置,但在两目标点之间存在着跟踪误差.为提高跟踪精度,对Robot2的关节轨迹参数的选择给出如下约束:

$$\ln \left( \frac{\theta(t + t_0) - \theta'}{\theta' - \theta(t_0)} \right) = \frac{\alpha(a - a')}{b}. \quad (18)$$

式中: $\theta'(t)$ 是运动周期内,当所跟踪工件的边缘段的中点移动到 $\{O_{obj}\}$ 的 $X$ 轴上时,Robot2跟踪边缘

对应的关节值, 这时, 工件沿  $\{O_{obj}\}$  的  $Y$  轴移动  $(1/2)\Delta Y$ ,  $\theta'(t)$  根据中点对应的  $X$  轴增量通过式 (6) ~ (8) 求出;  $a'$  由边缘中点通过  $X$  轴的时间决定. 选择满足上式的  $a, b$  和  $\alpha$ , 可使 Robot2 精确地跟踪到该周期内曲线段的中点, 这样将一个边缘段分成两条直线段逼近, 从而提高了边缘的跟踪精度

### 3 边缘跟踪算法

Robot1 沿  $Y$  轴方向运动  $\Delta Y$  后, 边缘与  $X$  轴的交点可能不止一个. 两相邻交点间的边缘段表现出凹凸性, 如果工件始终按不变的方向沿  $Y$  轴运动, Robot2 必然失去对其中一段边缘的跟踪

采用以极值为特征点的多段曲线跟踪方法来实现对复杂曲线的连续跟踪. 如图 3 所示. 任意给定曲线  $y = f(x)$ ,  $x \in [x_i, x_i]$ , 曲线分别在  $x = x_1, x_2$  处存在极大值,  $x = x_3$  处存在极小值. 于是将曲线在  $[x_1, x_i]$  内分为  $[x_i, x_1], [x_1, x_2], [x_2, x_3]$  和  $[x_3, x_i]$  四段, 分别进行跟踪. 必须强调的是, 点  $(x_i, f(x_i)), (x_1, f(x_1)), (x_2, f(x_2)), (x_3, f(x_3))$  和  $(x_i, f(x_i))$  为曲线的特征约束点, 是跟踪轨迹必须精确到达的目标点

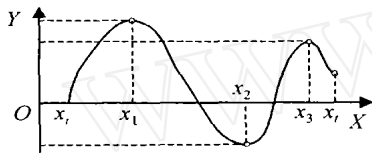


图 3 跟踪曲线分析

假设  $\{P_i(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, k-1, k\}$  为曲线的约束点, 其中  $P_1(x_1, y_1)$  和  $P_k(x_k, y_k)$  分别是曲线的端点, 也是跟踪的起始点和结束点, 其余点为曲线的极值点.  $t = 0$  开始, 从  $P_1(x_1, y_1)$  点开始跟踪, 跟踪前先做如下工作:

- 1) 当  $y_1 > 0$  时, 若  $y_1 > y_2$ , 曲线沿  $Y$  轴的负方向移动  $y_1, Y_i = y_i - y_1$ , 否则  $Y_i = y_i$ ;
- 2) 当  $y_1 < 0$  时, 若  $y_1 < y_2$ , 曲线沿  $Y$  轴正方向移动  $y_1, Y_i = y_i + y_1$ , 否则  $Y_i = y_i$ ;

令  $Y_0 = 0, j = 2, \Delta Y(t)$  为当前跟踪分段内曲线沿  $Y$  轴的运动量, 分段跟踪算法如下:

- 1)  $Y_0 = Y_j - Y_0$ , 若  $Y_0 > 0$ , 则曲线沿  $Y$  轴的负方向移动, 否则相反;
- 2) 当  $|Y_0| - \Delta Y(t) = 0$ , 令  $j = j + 1$ , 若  $j = k$ , 则跟踪结束, 否则  $Y_0 = Y_j$ , 转到 1).

### 4 仿真与应用

将运动规划方法进行仿真研究. 为简单起见, 仿真实验中, 两机器人仅各具有一个移动自由度; 选择正弦曲线  $y = \sin x, x \in [0, 2\pi]$  进行跟踪; 设定  $\Delta Y = 0.05$ , 跟踪运动周期  $\Delta t = 1$  s; Robot1 的轨迹

函数参数固定, 分别为  $d = 0.05, a = 0$  (即曲线段中点在  $t = 1/2\Delta t$  时刻通过  $X$  轴),  $B = 18.95$  (对应时间分别为  $t = 0.05$  s 和  $t = 0.95$  s 的时刻). 确定 Robot2 的轨迹修正规则如下: 参数  $d = 0.05, b = 18.95, a$  通过式 (18) 确定

由式

$$s_{err} = \sqrt{1 + (y'(x))^2} dx - \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

可知: 基于直线插补方法的跟踪轨迹在  $Y = 0.95$  后的一个跟踪周期内, 跟踪轨迹与理论正弦曲线的误差最大. 图 4(a) 中, 曲线 ① 是 Robot1 的运动轨迹, 曲线 ② 和 ③ 分别是 Robot2 的修正轨迹 ( $\alpha = 7.5394$ ) 和未修正轨迹 ( $\alpha = 0$ ); 图 4(b) 给出了跟踪曲线与理论正弦曲线的误差变化, 曲线 ① 和 ② 分别描述了未修正轨迹和修正轨迹与正弦曲线的误差变化, 显然, 修正后的跟踪曲线具有更好的跟踪精度

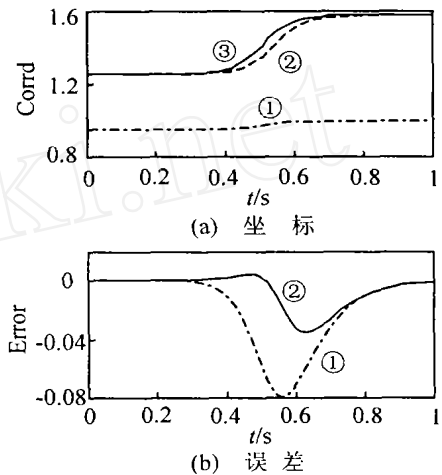


图 4  $Y = 0.95$  后的一个周期内的跟踪结果

图 5 给出  $Y = 0.5$  后的一个跟踪周期内的仿真结果 (图中各曲线标法与图 4 相同), 由图 5(b) 可知, 修正后的轨迹 ( $\alpha = 0.1564$ ) 的跟踪轮廓精度明显优于未修正的轨迹 ( $\alpha = 0$ ) 的跟踪轮廓精度. 图 5 验证了该轨迹修正规则在整个正弦曲线跟踪过程中的有效性和适应性

将该运动规划用于微操作机械手的涂胶作业任务. 机械手由各具有 4 个自由度的左右臂和显微视觉系统组成. 机械手的左臂为主臂用于抓取工件和调整工件的位姿; 机械手的右臂为从臂, 用于跟踪工件完成协调作业任务. 独立于左右臂的显微视觉系统具有水平和垂直两路光学系统, 用于获取工件的位姿, 引导机械手完成跟踪、涂胶以及装配等操作. 利用显微视觉系统获取的显微图像, 可以代替工件复杂边缘的空间表示, 这使得双机器人跟踪复杂边缘的规划变得简单易行.

实验中, 靶腔的边缘为圆形. 由显微视觉获取边

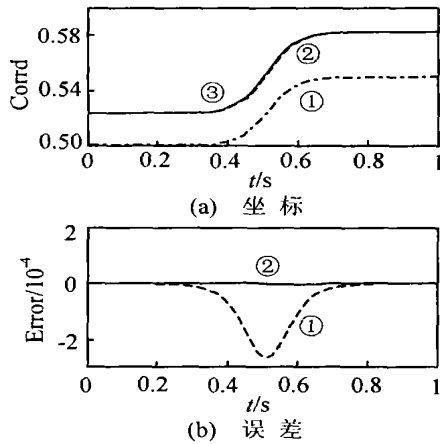


图5  $Y = 0.5$  后的一个周期内的跟踪结果

缘上任意3点的位置坐标,由此获得边缘所在平面并建立工件坐标系;主、从臂的姿态调整后不再改变,规划并控制主臂和从臂分别在 $Y$ 轴和 $X$ 轴方向上的运动来跟踪靶腔边缘;跟踪过程中,机械手跟踪的目标点由显微视觉系统确定,一个跟踪周期取1s

实验过程中,机械手运动平稳.良好的圆形边缘跟踪结果表明了该协调运动规划的有效性.限于篇幅,有关实验数据和图片在此不再给出

## 5 结 语

本文以平面复杂边缘跟踪任务为对象,进行了以下研究:

1) 对双机器人的跟踪任务进行了协调规划,通过坐标系变换,将跟踪问题转移到平面上讨论,进而分析了双机器人的位置约束关系;

2) 针对位置、速度、加速度以及加加速度等平滑约束条件,在关节空间规划了双机器人的双曲线运动轨迹,为提高跟踪的轮廓精度,建立了机器人的双曲线轨迹的参数约束方程;

3) 考虑跟踪的可靠性和边缘的适用性,提出了

有效的基于边缘极值特征点的边缘分段跟踪算法;

4) 以正弦曲线为例,对该运动规划方法进行了仿真实验,进一步,在双臂微操作机械手的靶腔涂胶作业中应用了该规划方法和边缘跟踪算法

因为本文研究的内容是针对一般性机器人和一般性作业任务提出的,所以具有较好的通用性.实验和应用均表明了该运动规划方法的可行性和正确性

## 参考文献 (References)

- [1] 顾新兴,孙燕朴,冯纯伯.多机器人协调系统研究综述[J].*系统工程与电子技术*,1994,16(12):9-20  
(Gu X X, Sun Y P, Feng C B. Review of Study on Coordinated Multiple Robots System [J]. *System Engineering and Electronic Technology*, 1994, 16 (12): 9-20)
- [2] 习文明,文巨峰,颜景平.摄像机控制下的双机器人协调跟踪复杂边缘的运动规划[J].*机械设计*,2000,17(6):36-38  
(Xi W M, Wen J F, Yan J P. Motion Planning for Complex Edge Coordinated Tracking with Dual-robot Controlled by Vidicon [J]. *Machinery Design*, 2000, 17 (6): 36-38)
- [3] 汤宇松,黄亚楼,卢桂章.双机器人协调完成复杂边缘跟踪的运动规划[J].*机器人*,1998,20(4):253-257.  
(Tang Y S, Huang Y L, Lu G Z. Motion Planning for Complex Edge Tracking with Two Coordinated Industrial Robots [J]. *Robot*, 1998, 20(4): 253-257.)
- [4] Isobe T, Nagasaka K, Yamamoto S. A New Approach to Kinematic Control of Simple Manipulators [J]. *IEEE System, Man and Cybernetics*, 1992, 22 (5): 1116-1124
- [5] Muller Karger C M, Granados M irena A L, Scarpatti Lopez J T. Hyperbolic Trajectories for Pick-and-place Operations to Elude Obstacles [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2000, 16(3): 294-299
- [7] Xu S, Chen T. Robust  $H_\infty$  Control for Uncertain Stochastic Systems with State Delay [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(12): 2089-2094
- [8] Boukas E K, Yang H. Exponential Stabilizability of Stochastic Systems with Markovian Jumping Parameters [J]. *Automatica*, 1999, 35(8): 1437-1441.
- [9] Feng X, Loparo K A, Ji Y, et al. Stochastic Stability Properties of Jump Linear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(1): 38-53
- [10] Kolmanovskii V B, Myshkina A D. *Applied Theory of Functional Differential Equations* [M]. The Netherlands: Kluwer, 1992

(上接第1373页)

[5] 邓飞其,陈金堂,刘永清.多模态Ito随机系统的均方稳定性与鲁棒镇定[J].*控制理论与应用*,2000,17(4),569-572

(Deng F Q, Chen J T, Liu Y Q. Mean Square Stability and Robust Stabilization of Multiple-mode Ito Stochastic Systems [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(4): 569-572)

[6] 吴淮南,谢凯年,尤昌德.随机系统的鲁棒状态反馈控制[J].*信息与控制*,1998,27(1):1-5

(Wu H N, Xie K N, You C D. Robust State-feedback Control of Stochastic System [J]. *Information and Control*, 1998, 27(1): 1-5)