

文章编号: 1001 - 2265(2012)07 - 0033 - 06

## 基于时间最优的搬运机器人运动规划\*

曹波<sup>1</sup>, 曹其新<sup>1</sup>, 童上高<sup>2</sup>, 李佳平<sup>2</sup>, 栾南<sup>1</sup>, 冷春涛<sup>1</sup>, 李彰植<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海沃迪科技有限公司, 上海 201114)

**摘要:** 为了提高搬运机器人在码垛过程中的速度和运动平稳性, 在其关节空间内, 以时间最短为规划目标, 采用三次样条曲线对搬运机器人的运动轨迹进行规划, 保证其速度、加速度连续; 针对搬运机器人的特定的工作方式和特定的机械结构, 在传统的 PTP 运动模式基础上提出一种基于时间最优的规划方法, 对机器人整个码垛过程进行再规划。通过实验验证, 运动优化后, 其码垛速度大大提高。

**关键词:** 运动规划; 轨迹规划; 搬运机器人; s 型曲线

中图分类号: TH162; TP241.2 文献标识码: A

### The Motion planning of Handling Robot Based on Time Optimal

CAO Bo<sup>1</sup>, CAO Qi-xin<sup>1</sup>, TONG Shang-gao<sup>2</sup>, LI Jia-ping<sup>2</sup>, LUAN Nan<sup>1</sup>, LENG Chun-tao<sup>1</sup>, LI Zhang-zhi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Triwin Tech Company, Shanghai 201114, China)

**Abstract:** In order to improve the speed and stationarity of the Handling robot when working, the robot's trajectory is planned in joint space using Cubic spline curve, so that the speed and acceleration is consequent. For the specific movement and mechanical structure of the robot, A Planning method based on time optimal is proposed in the traditional model based on the PTP movement, the trajectory of palletizing process is re-planned. At last, it is verified that the speed of palletizing is greatly improved by using the method.

**Key words:** motion planning; trajectory planning; handling robot; S-shaped curve

## 0 引言

搬运机器人属于一种常见的工业机器人, 主要应用于物流自动化领域, 用于代替人工进行自动码垛。随着生产规模的扩大和自动化水平的提高, 对搬运机器人的堆垛速度提出了更高的要求; 同时, 搬运机器人在工作过程中频繁地快速启动、快速停止, 对机械结构的冲击和磨损很严重。因此, 为了能够使搬运机器人在码垛过程中快速平稳, 运动规划对机器人的作业非常重要。

机器人运动规划主要研究机器人在工作空间中构建一条从起点到终点, 或者从起始位姿(位置+姿态)到终止位姿的无碰、高效的运动序列<sup>[1]</sup>。机器人运动规划通常又可分为路径规划和轨迹规划上下两级: 路径规划用于在机器人操作空间或关节空间中产生一无碰撞的几何路径; 轨迹规划用于产生机器人沿着该几何路径运动<sup>[2]</sup>。

常见的运动规划方法主要有人工势场法、栅格法、遗传算法和模糊控制等。人工势场法和栅格法主要用于机器人所在环境中障碍物比较多的场合, 其规划目标是在机器人在运动过程中如何避开这些障碍物成功到达目标点, 而不是以到达目标点的时间作为规划目标<sup>[3-4]</sup>。把遗传算法或模糊控制应用到轨迹规划上, 造成计算复杂程度上升, 计算量大大的增加, 不利于机器人的实时控制。本文涉及的搬运机器人采用的是 PTP (点到点) 运动控制模式, 根据机器人实物结构和工作环境运动方式, 在传统的 PTP 运动规划的基础上, 提出了一种以时间最优为规划目标的规划方法, 并用于实际工程项目中, 提高搬运机器人工作效率。

## 1 搬运机器人特点

本文采用的搬运机器人为一种四自由度的工业机器人, 通过机构设计实现了圆柱坐标系下的解耦运动。在机器人工作过程中, 其第四关节的旋转中心总是垂

收稿日期: 2011 - 12 - 13; 修回日期: 2012 - 02 - 02

\* 基金项目: 863 重点攻关项目(2009AA043903) 搬运工业机器人产业化

作者简介: 曹波(1986—) 男, 江西人, 上海交通大学机械与动力工程学院硕士研究生, 研究方向为工业机器人运动控制, (E-mail) hbwh-hk123@163.com。

直于基座平面,机器人手抓装在该关节上,如图 1 所示为其实物样机。机器人的前三个关节运动为圆柱坐标  $(R, \theta, Z)$ , 第四个关节为手抓的旋转运动。第一个关节为腰部旋转关节,为圆柱坐标的旋转角  $\theta$ ; 第二个关节为上下运动,为圆柱坐标的  $Z$ ; 第三个关节为水平方向运动,为圆柱坐标的  $R$ 。我们把机器人从第一到第四的关节分别定义为  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  四个关节。

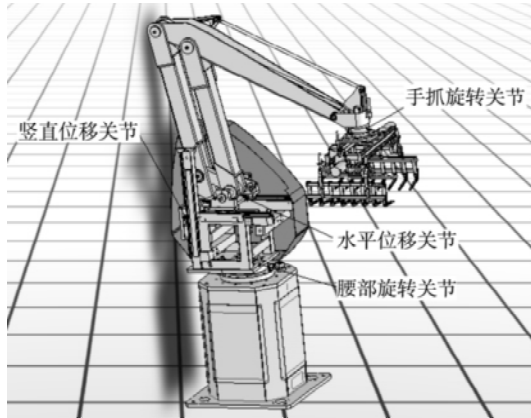


图 1 搬运机器人实物样机

## 2 轨迹规划中的柔性加减速控制

搬运机器人在应用中总是处于频繁的快速启动/停止和高速的运动方式,其加、减速过程对机器的性能影响很大。要想使机器运转得更快、定位更精确和更稳定可靠,那么,当它启动和停止时就必须是平缓的,而不应出现加速度突变。即让速度特性曲线为 S 型,而不是梯形。因此其各关节轨迹采用 S 型曲线进行规划<sup>[11]</sup>。

S 型曲线由 7 个不同的部分组成,如图 2 所示,在第一阶段,加速度从零开始做变加速运动,直到加速度达到最大,在该阶段加速度变化率始终处于允许最大值;在第二阶段,加速度保持最大做匀加速运动;在第三阶段,加速度从最大开始减小到零的变加速运动,且加速度变化率为负的最大值,此时速度达到最大。第四阶段匀速运动;第五到第七阶段,反向重复第一到第三阶段的状态。

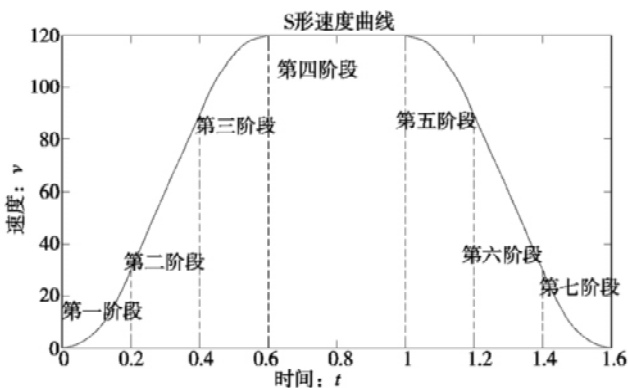


图 2 S 型速度曲线

S 型曲线的各个阶段的插值函数的选择对其轨迹规划至关重要,对于工业机器人的运动,基本上采用样条曲线拟合。不同的机器人,不同的应用环境,选择的样条曲线的最高次数都不同。一般来讲,约束条件越多,所选择的样条曲线次数越高,其运动越平稳,但是,选择的样条曲线次数越高,其加速时间就越长,并且由于其选择的样条曲线次数越高,可能带来整个系统产生振荡。因此,样条曲线的次数并不是越高越好。本文研究的搬运机器人运动模式为 PTP 运动模式,在整个运动过程中应满足下列约束条件:

$$\begin{cases} \theta_i(t_0) = \theta_{0i} \\ \dot{\theta}_i(t_0) = 0 \\ \ddot{\theta}_i(t_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \theta_i(t_1) = \theta_{1i} \\ \dot{\theta}_i(t_1) = 0 \\ \ddot{\theta}_i(t_1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(t) \leq V_{i \max} \\ \ddot{\theta}_i(t) \leq a_{i \max} \\ \theta_i(t) \leq A_i \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\theta_i(t)$  为关节转角,  $t_0$  为运动起始时刻,  $t_1$  为到达目标位置时刻。  $V_{i \max}$  为该关节速度所能达到的最大值,  $a_{i \max}$  为该关节所能达到的最大加速度,  $A_i$  为该关节最大加速变化率 ( $i=1, 2, 3, 4$ )。

对于 S 曲线的七个阶段,从图 2 中我们知道其中的 1、2、3 阶段和 5、6、7 阶段其规划过程基本相同,第四阶段为匀速运动,因此只针对 1、2、3 阶段进行规划,5、6、7 段取其镜像对称。选择三次样条曲线规划,则对于这三个阶段的轨迹方程为:

$$\text{(第一阶段)} \quad \theta_i(t) = a_{1i}t^3 + b_{1i}t^2 + c_{1i}t + d_{1i} \quad (4)$$

$$\text{(第二阶段)} \quad \theta_i(t) = a_{2i}t^2 + b_{2i}t + c_{2i} \quad (5)$$

$$\text{(第三阶段)} \quad \theta_i(t) = a_{3i}t^3 + b_{3i}t^2 + c_{3i}t + d_{3i} \quad (6)$$

令起始时刻的时间  $t_0 = 0$ , 根据已知约束条件,代入方程中解方程组得到:

$$\begin{cases} a_{1i} = \frac{A_i}{6} \\ b_{1i} = 0 \\ c_{1i} = 0 \\ d_{1i} = \theta_{0i} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_{2i} = \frac{a_{i \max}}{2} \\ b_{2i} = -\frac{a_{i \max}^2}{2A_i} \\ c_{2i} = \frac{a_{i \max}^3}{6A_i^2} + \theta_{0i} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} a_{i3} = \frac{A_i}{6} \\ b_{i3} = -\left(\frac{a_{imax}}{2} + \frac{A_i V_{imax}}{2a_{imax}}\right) \\ c_{i3} = 2V_{imax} + \frac{A_i V_{imax}^2}{2a_{imax}^2} - \frac{a_{imax}^2}{2A_i} \\ d_{i3} = \theta_{i0} + \frac{a_{imax}^3}{6A_i^2} - \frac{A_i V_{imax}^3}{6a_{imax}^3} - \frac{V_{imax}^2}{a_{imax}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} t_0 = 0 \\ t_1 = \frac{a_{imax}}{A_i} + \frac{V_{imax}}{a_{imax}} \end{cases}$$

通过  $t_1$  的表达式,可以看出,在两点位移足够大的情况下,规划过程的最短加速时间与该关节的最大速度  $V_{imax}$ 、最大允许加速度  $a_{imax}$  以及最大允许加速度变化率  $A_i$  有关。 $V_{imax}$  可以通过安装于该电机的最高转速以及该关节的减速比确定。 $a_{imax}$  可以通过电机的速度—转矩特性以及该关节的在该两点间所受到的最大转动惯量来确定。 $A_i$  可通过实验实测得到。

如果两点间的位移较小,在这段位移内不能加速到该关节允许的最大速度,则没有第四阶段的匀速运动过程,且第二阶段的匀加速阶段变短,这样整个过程变成由第一、第二、第三、第五、第六和第七阶段组成。其速度曲线如图3所示。

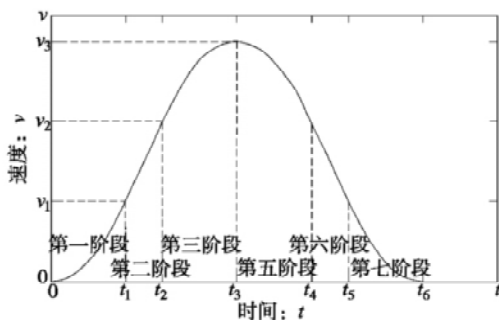


图3 小位移 S 型速度曲线

第一阶段和第三阶段过程中加速度变化率都是取最大的,所以在这两个阶段的时间相同既  $t_1 = t_3 - t_2$ ,且有  $V_3 = V_1 + V_2$ 。在这种情况下,第一阶段的加速过程和前面位移足够大的情况完全一样,所以插值函数不变;第二阶段的初始条件也一样,所以插值函数也不变,但是加速时间变短;第三阶段初始速度和终点速度不一样,所以插值函数不同,根据公式(4)和(7)可求出  $V_1 = \frac{a_{imax}^2}{2A_i}$ 。要得到插值函数需要求出  $V_2, V_3$  和时间  $t_2$  和  $t_3$ 。根据 S 型速度曲线的特点,则有:

$$\begin{cases} V_3 t_1 + \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \cdot (t_2 - t_1) = \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2} \\ V_3 = V_1 + V_2 \\ t_1 = t_3 - t_2 \\ V_2 = V_1 + a_{imax}(t_2 - t_1) \end{cases}$$

解方程组可得:

$$\begin{cases} t_2 = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{a_{imax}^2}{A_i^2} + \frac{4(\theta_{i1} - \theta_{i0})}{a_{imax}}} - \frac{a_{imax}}{A_i} \right) \\ t_3 = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{a_{imax}^2}{A_i^2} + \frac{4(\theta_{i1} - \theta_{i0})}{a_{imax}}} + \frac{a_{imax}}{A_i} \right) \\ V_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a_{imax}^4}{A_i^2} + 4a_{imax}(\theta_{i1} - \theta_{i0})} - \frac{a_{imax}^2}{A_i} \\ V_3 = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{a_{imax}^4}{A_i^2} + 4a_{imax}(\theta_{i1} - \theta_{i0})} - \frac{a_{imax}^2}{A_i} \right) \end{cases}$$

第三阶段的插值函数为:

$$\theta_i(t) = V_3 t - \frac{A_i}{6}(t - t_3)^3 - \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2}$$

把  $V_3, t_3$  代入公式中可得:

$$\theta_i(t) = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{a_{imax}^4}{A_i^2} + 4a_{imax}(\theta_{i1} - \theta_{i0})} - \frac{a_{imax}^2}{A_i} \right) t - \frac{A_i}{6} \left( t - \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{a_{imax}^2}{A_i^2} + \frac{4(\theta_{i1} - \theta_{i0})}{a_{imax}}} + \frac{a_{imax}}{A_i} \right) \right)^3 - \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2} \quad (10)$$

如果位移更小,不足以使该关节达到最大加速度,则整个过程由第一、第三第五和第七阶段组成,如图4所示。

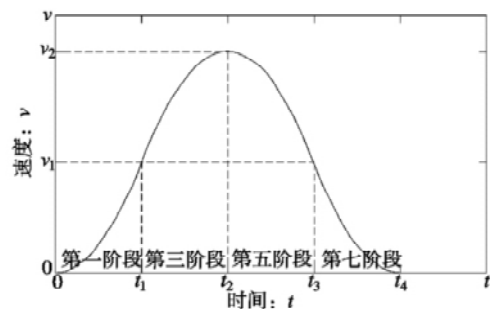


图4 极小位移 S 型速度曲线

在此种情况下,第一阶段的起始条件一样,所以插值函数不变,但时间缩短;第三阶段的起始条件不同,根据 S 型速度曲线的特点,假设该阶段的插值函数为:

$$\theta_i(t) = V_2 t - \frac{A_i}{6}(t - t_2)^3 - \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2}$$

根据运动学有:

$$\begin{cases} V_2 = 2V_1 \\ V_2(t_2 - t_1) = \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2} \\ t_2 = 2t_1 \\ V_1 = \frac{A_i}{2} t_1^2 \end{cases}$$

解方程组得:

$$\begin{cases} t_2 = 2 \cdot \left( \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2A_i} \right)^{\frac{1}{3}} \\ V_2 = A_i \cdot \left( \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2A_i} \right)^{\frac{2}{3}} \end{cases}$$

代入公式可得其插值函数为:

$$\theta_i(t) = A_i \left( \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2A_i} \right)^{\frac{2}{3}} t - \frac{A_i}{6} \left( t - 2 \cdot \left( \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2A_i} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^3 - \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{2} \quad (11)$$

### 3 全局时间最优规划

搬运机器人在正常工作过程中运动模式为点位运动,在满足各种约束的情况下,通过规划使其在这两点之间的运动时间最短。机器人在工作过程中其运动分为 3 个阶段如图 3 所示。上升阶段:机器人抓手从流水线的上的抓取位抓取产品,上升到挡板的高度;到位阶段:机器人从抓取位上方运动到堆垛位的上方;下降阶段:机器人从码垛上方下降到堆垛位进行堆垛。由于本文中的轨迹规划是在关节空间中进行的,所以图 5 中的码垛过程所经过的点在最后进行规划是需要先转化为关节坐标。

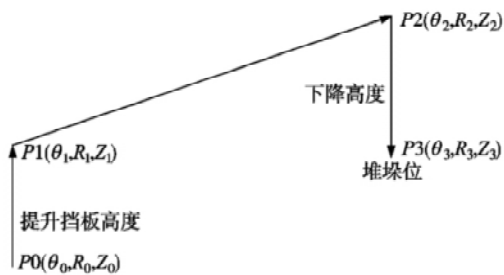


图 5 码垛运行轨迹

码垛过程的 3 个阶段中,只有 B 关节都需要运动,其他关节都是在第二个阶段中运动的,在整个过程中 B 需要做 3 次加减速过程,其加速度如图 6 所示,速度为负表示 B 关节向下运动。

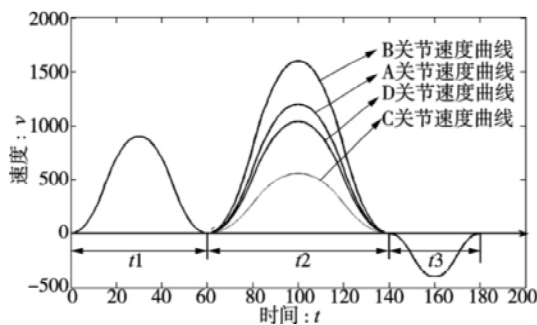


图 6 码垛运动优化前速度曲线

为了提高搬运机器人的码垛速度,根据机器人的特殊结构以及特定的运动模式,我们可以把 B 关节的 3 个加减速运动过程合并为两个过程,其末端抓手轨迹如图 7 所示,并对整个运动过程进行再规划,在满足约束条件下,既码垛过程依次经过点 P0、P1、P2 和 P3,并且保证时间最短。

从图 8 中可以看出,机器人末端抓手在经过 P1 点时有一个上升速度,在经过 P2 时有一个下降速度。为了使机器人抓手从 P0 到 P1 的上升阶段的规

划时间最短,需要有足够的加速距离;为了使机器人抓手从 P2 到 P3 的下降阶段的规划时间最短,在 P2 时要有足够的速度,因而需要有一个加速度过程。因此整个规划过程的关键是需要确定码垛上升的最高点的位置,最高点选取过低,机器人从 P0 到 P1 的上升阶段和从 P2 到 P3 的下降阶段的时间不是最短,最高点选取过高,增加了码垛过程第二阶段的时间。

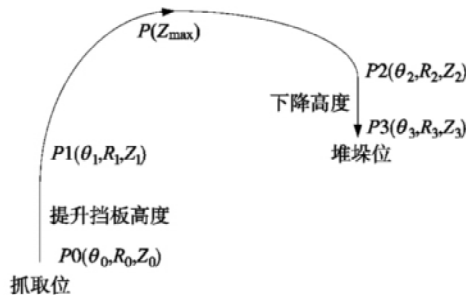


图 7 规划后码垛运行轨迹

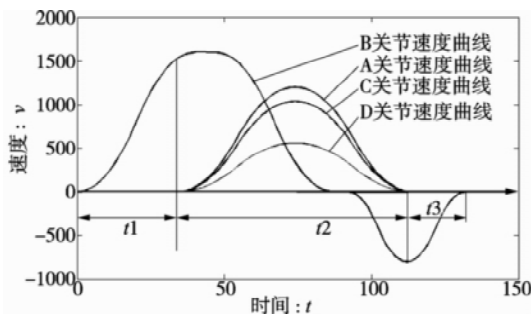


图 8 码垛过程优化后速度曲线

在某个码垛过程中,点 P0(θ0, R0, Z0)、P1(θ1, R1, Z1)、P2(θ2, R2, Z2) 和 P3(θ3, R3, Z3) 是已知的,假设第一阶段 P0→P1 的规划时间为 t1,第二阶段 P1→P2 的规划时间为 t2,第三阶段 P2→P3 的规划时间为 t3,整个规划时间 t = t1 + t2 + t3,需要求 B 关节最高点 Zmax。

根据码垛条件可知,最高点 Zmax 应满足下列约束关系:

$$\begin{cases} Z_{max} \geq \max(Z_0, Z_1, Z_2, Z_3) \\ Z_{max} \leq Z_{top} \end{cases} \quad (12)$$

其中 Ztop 为 B 关节允许上升的最大高度。

由公式(7)、(8)、(9)可以得到 B 关节在上升阶段和下降阶段的轨迹规划方程,根据轨迹规划方程可以算出机器人手抓末端从点 P0→P1 的时间 t1,即 t1 是个关于 Z0、Z1、Zmax 的方程,可表示为:

$$t_1 = f(Z_0, Z_1, Z_{max}) \quad (13)$$

同理可以求出满足 t3 和 Z2、Z3、Zmax 的函数关系:

$$t_3 = g(Z_2, Z_3, Z_{max}) \quad (14)$$

码垛过程的第二个阶段 A、B、C 和 D 关节开始联动,因此 t2 不仅与 Zmax 有关,还与 A、C 和 D 的规划时

间有关,令

$$t_{temp} = f'(Z_0, Z_{max}) + g'(Z_{max}, Z_3) - t_1 - t_3 \quad (15)$$

其中  $f'(Z_0, Z_{max})$  为 B 关节从  $Z_0$  上升到  $Z_{max}$  的规划时间,  $g'(Z_{max}, Z_3)$  为 B 关节从  $Z_{max}$  下降到  $Z_3$  的规划时间。若  $t_{temp} \geq \max(t_A, t_C, t_D)$ , 则  $t_2 = t_{temp}$ ; 若  $t_{temp} \leq \max(t_A, t_C, t_D)$ , 则  $t_2 = \max(t_A, t_C, t_D)$ 。所以当  $t_{temp} \geq \max(t_A, t_C, t_D)$  时:

$$t = f'(Z_0, Z_{max}) + g'(Z_{max}, Z_3) \quad (16)$$

当  $t_{temp} \leq \max(t_A, t_C, t_D)$  时:

$$t = \max(t_A, t_C, t_D) + f(Z_0, Z_1, Z_{max}) + g(Z_2, Z_3, Z_{max}) \quad (17)$$

可以看出  $t, t_1, t_2, t_3$  为关于  $Z_{max}$  的方程, 其关系如下图所示。

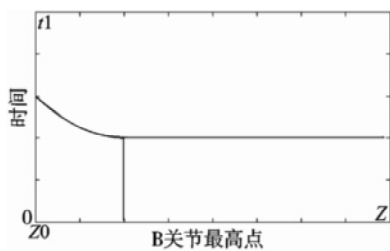


图9 B 关节最高点与码垛上升阶段的时间关系

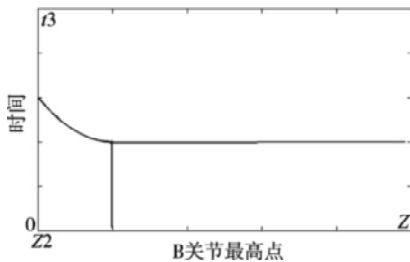


图10 B 关节最高点与码垛下降阶段的时间关系

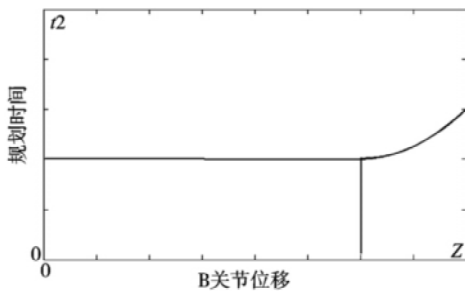


图11 B 关节最高点与码垛到位阶段的时间关系

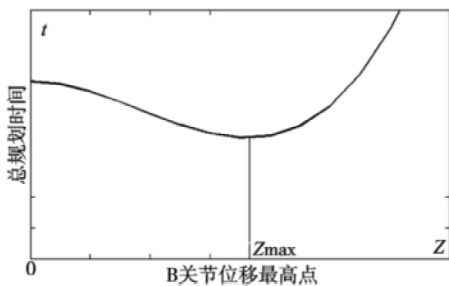


图12 总规划时间与 B 关节位移最高点的关系

根据方程和已知条件可以求出  $Z_{max}$ , 使得整个码垛过程的时间最短。公式中  $t_A, t_C, t_D$  分别为 A、和 D

关节在码垛过程中第二阶段的规划时间。

#### 4 实验结果与分析

采用实物搬运机器人来验证本文提出方法的正确性。实验条件为: 负载为 100kg, 抓取位的基座坐标 (1200, 0, 400); 产品堆垛方式如图 13 所示, 产品为长方体 (600 × 400 × 200) 的方块, 图中坐标为产品几何中心相对于托盘坐标系下的, 托盘中心点相对机器人基座坐标为 (0, 1400, 400); 码垛过程总共堆 5 层, 相邻层 180° 交错码垛; 码垛过程上升高度为 400mm, 下降高度为 200mm。码垛时, 机器人末端采用 100kg 的铁块做为其负载, 因此在机器人在整个运行过程中始终是满载的。

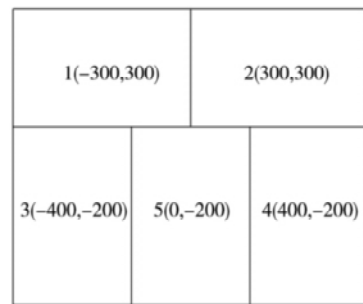


图13 产品堆垛方式

分别采用传统的 PTP 运动规划和本文提出的优化方法进行规划, 并在实际机器人进行验证, 结果如表 1 所示。

表1 码垛时间对比

时间	规划时间(s)	运行时间(s)
优化前	107.854	112.997
优化后	91.850	96.973

从表 1 中可以看出, 优化前, 实际码垛的平均速度为 4.520 秒/单位; 优化后, 实际码垛的平均速度为 3.879 秒/单位。从以上实验可以看出本文提出的优化方法效率明显提高。表 1 中机器人的实际运行时间比规划时间长, 这是由于系统需要消除跟随误差的缘故。

#### 5 结束语

在其关节空间内, 采用 S 型速度曲线对码垛机器人的各个关节的运行轨迹进行规划。针对码垛机器人特定的运动方式和特定的机械结构, 在传统的 PTP 运动模式的规划的基础上对整个码垛过程进行再规划, 从而达到规划时间最短。通过实验验证, 对整个码垛过程经过优化后的, 其速度大大提高, 运行也平稳, 并且该方法计算量小, 编程控制容易实现, 控制算法对控制器的要求不高, 大大节省成本。

[参考文献]

[1] 马雪英, 何臻峰, 林兰芬. 人工智能技术在机器人运动规

划中的应用[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(4): 135 - 138.

[2] 钱东海, 谭伟, 赵锡芳. 基于 B 样条路径的机器人时间最优轨迹规划[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(12): 29 - 32.

[3] 王小忠, 孟正大. 机器人运动规划方法研究[J]. 控制工程, 2004, 11(3): 280 - 284.

[4] 王醒策, 张汝波, 顾国昌. 基于市场栅格法的机器人全局路径规划[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(3): 170 - 174.

[5] GARG D P, KUMAR M. Optimization techniques applied to multiple manipulators for path planning and torque minimization[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2002, 15(3-4): 241 - 252.

[6] CAO B, DODDS G I, IRWIN G W. Constrained time-efficient and smooth cubic spline trajectory generation for industrial

robots [J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 1997, 144(5): 467 - 475.

[7] 谭冠政, 王越超. 工业机器人时间最优轨迹规划及轨迹控制的理论与实验研究[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(4): 185 - 192.

[8] 杨国军, 崔平远. 机械手时间最优轨迹规划方法研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(20): 1715 - 1717.

[9] 徐海黎, 解祥荣, 庄健, 等. 工业机器人的最有时间与最优能量轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 19 - 25.

[10] 凌家良, 施荣华, 王国才. 工业机器人关节空间的插值轨迹规划[J]. 惠州学院学报, 2009(3): 52 - 57.

[11] Chelmsford Mass 杨进录. 如何使机械运动部件控制最佳[J]. 电子工业专用设备, 2005, 34(3): 25 - 27.

(编辑 李秀敏)

(上接第 32 页)



图 4 程序编辑界面图



图 5 主控界面结构图

图 6 中给出了刀具轨迹仿真图和加工结果, 从仿真图和加工结果的比较可以看出, 二者保持了很好的一致性, 可以验证本文所设计的轨迹仿真方法对实际加工结果的验证和监视切实可行。

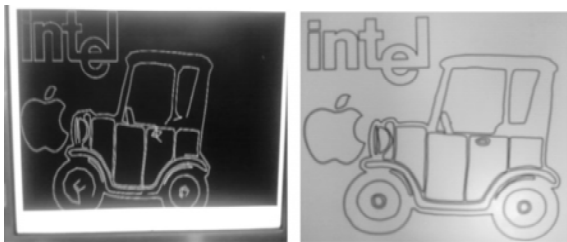


图 6 轨迹仿真(左)和加工结果(右)

### 7 结束语

本文在以 ARM 作为硬件内核和嵌入式 Linux 作为软件的平台, 设计了一种基于 Qt 的应用于数控

系统的人机交互方法。该方法以 USB 鼠标键盘或数控系统自定义的操作编辑键盘作为输入接口, 实现了友好的人机界面操作。图形仿真功能能够根据 NC 代码在加工前或者加工过程中绘制刀具的二维轨迹和三维轨迹, 可以验证编程的正确性并实现加工过程的监视和保护。人机交互系统的开发充分利用了 Qt 的信号与槽的机制, 程序简捷稳定, 在嵌入式平台上的实现验证了方法的可行性。

#### [参考文献]

[1] X. W. Xu and S. T. Newman. Making CNC machine tool-smore open, interoperable and intelligent—a review of the technologies [J]. Computers in Industry, 2006, 57(2): 141 - 152.

[2] 唐润寰. 基于软件复用的嵌入式数控系统研究[J]. 微计算机信息, 2009, 12(2): 84 - 86.

[3] 魏胜. 数控机床伺服系统原理分析与性能调整[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(5): 81 - 82.

[4] 姚道敏, 俞立钧, 等. 数控系统译码模块程序设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(7): 73 - 76.

[5] Won-Soo Yun, Jeong Hoon Ko. Development of a virtual machining system [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002.

[6] 倪继利. Qt 及 Linux 操作系统窗口设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[7] 黄宇东, 胡跃明. 基于 Qt 的多线程技术应用与研究[J]. 软件导刊, 2009(10): 40 - 42.

[8] 张永强, 王嘉, 赵伟. 基于 ARM9 的 DNC 数控加工流程视频实时监视系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(6): 40 - 42.

[9] 黄卫军. 基于 Linux 和 Qt 的数控系统关键技术研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.

[10] William von Hagen, Real-Time and Performance Improvements in the 2.6 Linux Kernel [J]. Linux Journal, 2005(4): 1 - 10.

(编辑 李秀敏)