

文章编号: 1002-0446(2001)01-0011-04

## 非时间参考的机器人路径规划与控制方法<sup>\*</sup>

李 杰 韦 庆 常文森

(长沙国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

**摘 要:** 本文面向非结构化环境, 针对传统的基于时间的规划方法的不足, 提出了一种非时间参考的机器人路径规划方法; 并根据该规划的特点, 设计了相应的控制算法. 在这种规划方法下, 机器人遇到障碍时能自动停止运动, 而当障碍物被清除后, 又能沿以前的规划继续运动, 避免了系统所受到的损害和任务的重规划, 提高了系统处理不确定事件的能力.

**关键词:** 非时间参考的路径规划; 机器人规划; 机器人控制

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** B

## NON-TIME BASED TRAJECTORY PLANNING AND CONTROL FOR ROBOTS

LI Jie WEI Qing CHANG Wen-sen

(Dept. Of Automatic Control, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract:** This paper proposes the non-timed based robot trajectory planning method in order to overcome the disadvantage of the traditional time based planning in the non-structured environment, and designs the control law according to the speciality of this method. With this planning method, robot can automatically stop itself when it meets the obstacles; and when the obstacles were cleared away, the robot can go on its motion along the original planning. It avoids the damage of the system and the re-planning of the task, enhances the capability of the system to deal with the uncertainty events.

**Keywords:** non-time based trajectory planning, robot planning, robot control

### 1 引言 (Introduction)

机器人作为延长人的活动能力的工具, 最能发挥其作用的场所是人不能接近或对人类危险的环境, 如太空、深海、核工业等. 这些环境的特点是存在许多不确定性因素. 在这种环境中, 事先规划好的任务或路径很难顺利地执行, 机器人必须具有处理不确定性事件的能力, 同时还要保证机器人本身及其作业的安全性、可靠性, 减小甚至消除系统由于意外事件所受到的损害.

在传统的机器人路径规划方法中, 规划器是开环的, 它的输出是时间的函数. 这种结构使得规划器的规划值不包含机器人和环境的实时信息, 它随着时间的发展而运行, 即使机器人被障碍卡阻, 规划器

的输出仍然随时间而变化. 这样, 机器人的控制误差将随时间的增加而增加, 最终将导致机器人驱动单元、连杆或手爪等的损坏; 即使系统采取了保护措施, 避免了硬件系统的损坏, 但是要完成这次任务, 必须重新进行任务或路径的规划, 因为前一次的规划由于时间的演化已经无效. 这种情况严重影响了机器人系统的工作效率, 特别是在人不能接近的环境中, 要恢复正常的工作状态往往需要大量的工作.

为解决这个问题, 我们借鉴 Tarn T. J. 等人<sup>[1-3]</sup>的思想, 提出了一种基于机器人运动路径长度的规划与控制方法, 与传统的“基于时间”的规划方法对比, 我们称其为“非时间参考”的路径规划方法<sup>[6]</sup>. 这种方法的特点是规划器的输出是基于机器人的移动距离的, 当机器人被障碍等卡阻时, 它的移动距离停

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金和 863 项目资助.

收稿日期: 2000-03-22

止增加, 规划器的输出就停止变化, 相应的控制误差不再增加, 由于外在力矩与控制力矩的平衡, 机器人就停留在当前位置, 而不会受到损坏; 当障碍物等被清除后, 机器人在当前误差下又可继续沿以前的规划运动, 从而避免了任务的重新规划. 因此这种方法提高了系统的安全性和可靠性, 提高了系统在不确定性环境中作业的能力. 文献[1~3]中介绍了这种规划方法, 但他们提出的控制算法在实现上是不可行的. 本文通过分析非时间参考的路径规划的特点, 结合 PUMA 560 机械手的控制实验, 提出了可行的控制律, 并通过实验验证了非时间参考的规划与控制方法的有效性.

## 2 非时间参考的路径规划方法 (Non-time based trajectory planning)

在基于时间的路径规划中, 机器人沿给定路径的运动可以描述为

$$\begin{cases} ds/dt = v & |v| \leq v_m \\ dv/dt = a & |a| \leq a_m \end{cases} \quad (1)$$

其中  $s, v$  和  $a$  分别为机器人的位置、速度和加速度,  $v_m$  和  $a_m$  分别为最大速度和加速度约束,  $t$  为时间参考.

现用机器人的移动距离  $s$  代替时间参考  $t$ , 并定义  $w = v^2, u = da/ds$ , 将  $w$  对路径  $s$  微分, 可以得到

$$\begin{cases} dw/ds = 2a & |a| \leq a_m, |w| \leq w_m \\ da/ds = u & |u| \leq \mu_m \end{cases} \quad (2)$$

其中  $w_m = v_m^2$  为最大速度约束,  $a_m$  为最大加速度约束,  $u_m$  为最大加速度变化约束(电机特性等方面的约束).

方程(2)为二阶微分方程, 可以给出它的状态空间形式, 令  $x_1 = w, x_2 = a$ , 则状态矢量  $X = [x_1 \ x_2]^T$ , 对应的状态空间方程为

$$\frac{dx}{ds} = FX + Bu \quad (3)$$

其中  $F = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

显然, 给定上方程的边界条件  $X(s_0)$  和  $X(s_f)$  后, 方程的解不唯一. 下面我们按最短时间的优化标准解方程(3). 设计性能指标为

$$\begin{aligned} \min J &= \min \int_{s_0}^{s_f} \frac{1}{v} ds = \min \int_{s_0}^{s_f} \frac{1}{\sqrt{w}} ds \\ &= \min \int_{s_0}^{s_f} \frac{1}{x_1} ds \end{aligned}$$

边界条件  $X(s_0) = 0, X(s_f) = 0$ , 约束条件见(2)式.

利用旁得里亚金(Pontryagin)最大值原理<sup>[4]</sup>, 可以得到方程的最优解为

$$u = \begin{cases} u_m & s \in [s_0, s_1] \\ 0 & s \in [s_1, s_2] \\ -u_m & s \in [s_2, s_3] \\ 0 & s \in [s_3, s_4] \\ -u_m & s \in [s_4, s_5] \\ 0 & s \in [s_5, s_6] \\ u_m & s \in [s_6, s_f] \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} s_1 &= s_0 + a_m/u_m \\ s_2 &= s_0 + w_m/2a_m \\ s_3 &= s_0 + w_m/2a_m + a_m/u_m \\ s_4 &= s_f - w_m/2a_m - a_m/u_m \\ s_5 &= s_f - w_m/2a_m \\ s_6 &= s_f - a_m/u_m \end{aligned}$$

再利用关系  $a = \int_{s_0}^s u ds$  和  $v = \sqrt{w} = \int_{s_0}^s 2a ds$ , 分别得到加速度和速度的规划值为

$$a = \begin{cases} u_m(s - s_0) & s \in [s_0, s_1] \\ a_m & s \in [s_1, s_2] \\ -u_m(s - s_3) & s \in [s_2, s_3] \\ 0 & s \in [s_3, s_4] \\ -u_m(s - s_4) & s \in [s_4, s_5] \\ -a_m & s \in [s_5, s_6] \\ u_m(s - s_f) & s \in [s_6, s_f] \end{cases} \quad (5)$$

$$v = \begin{cases} (u_m s^2 - 2u_m s_0 s + u_m s_0^2)^{\frac{1}{2}} & s \in [s_0, s_1] \\ (2a_m(s - s_1) + a_m^2/u_m)^{\frac{1}{2}} & s \in [s_1, s_2] \\ (-u_m s^2 + 2u_m s_3 s + w_m - u_m s_3^2)^{\frac{1}{2}} & s \in [s_2, s_3] \\ v_m & s \in [s_3, s_4] \\ (-u_m s^2 + 2u_m s_4 s + w_m - u_m s_4^2)^{\frac{1}{2}} & s \in [s_4, s_5] \\ (-2a_m(s - s_5) + w_m - a_m^2/u_m)^{\frac{1}{2}} & s \in [s_5, s_6] \\ (u_m s^2 - 2u_m s_f s + u_m s_f^2)^{\frac{1}{2}} & s \in [s_6, s_f] \end{cases} \quad (6)$$

为了直观, 取  $u_m = 80$ , 最大加速度  $a_m = 1.0 \text{ m/s}^2$ , 最大速度  $v_m = 0.5 \text{ m/s}$ , 作出加速度和速度的规划曲线如图 1(a) 所示, 其横坐标为路径长度  $s$ ; 为了对比, 将横坐标换为时间  $t$ , 重新画出相同的规划值如图 1(b) 所示. 从图中看到, 以路径长度为参考得到的时间最短加速度和速度优化值相对于时间来讲也是连续的, 而且满足(2)中的约束条件, 这保证了优化路径实现的可行性和机器人运动过程的平稳性.

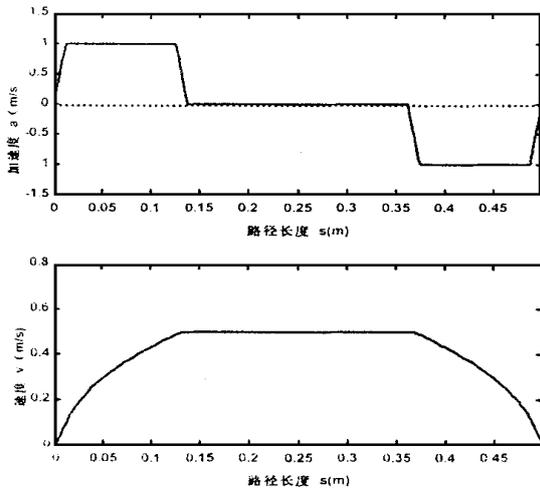


图 1(a) 加速度与速度对路径  $s$  的曲线

Fig. 1(a) Accelerate & velocity vs path length  $s$

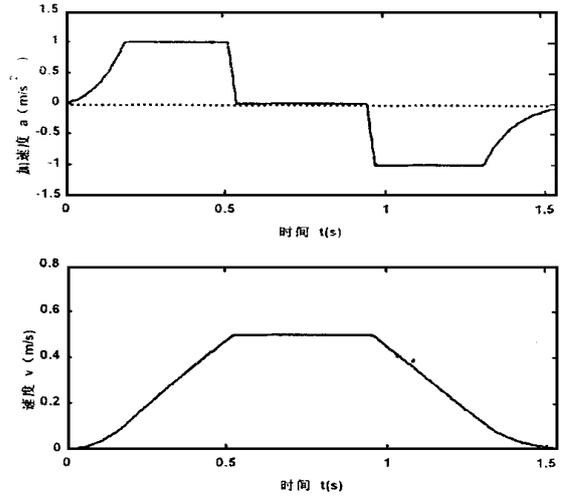


图 1(b) 加速度和速度对时间  $t$  的曲线

Fig. 1(b) Accelerate & velocity vs time  $t$

在实际控制过程中, 空间点到点(设起点为  $p_0$ , 终点为  $p_1$ )的规划一般需要同时规划  $XYZ$  三个方向的期望值, 这时的规划方法是: 首先计算机器人在  $\overline{p_0p_1}$  方向上的运动路径长度  $s$ , 然后利用式(5)和(6)得到期望的加速度和速度, 再将这两个量分别向  $XYZ$  三个轴上投影, 就可以得到期望的规划值. 公式如下:

$$\begin{cases} a_x^d = a \cos\alpha & v_x^d = v \cos\alpha \\ a_y^d = a \cos\beta & v_y^d = v \cos\beta \\ a_z^d = a \cos\gamma & v_z^d = v \cos\gamma \end{cases} \quad (7)$$

这里的  $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$  分别为矢量  $\overline{p_0p_1}$  在三坐标轴上的方向余弦. 期望的位置规划值可作同样的处理.

对于姿态的规划, 可以选择机器人转过的角度值作为非时间参考, 然后再将规划值向坐标轴上投影, 与位置规划方法类似.

### 3 非时间参考的机器人控制 (Non-time based robot control)

机器人操作空间的动力学方程可描述为<sup>[5]</sup>

$$H(\theta)\ddot{X} + B(\theta, \dot{\theta}) = F_c + F_e \quad (8)$$

其中,  $H(\theta)$  和  $B(\theta, \dot{\theta})$  分别为机器人操作空间的惯性矩阵哥氏离心重力矩阵,  $F_c$  和  $F_e$  分别为控制力矩和环境对机器人的作用力矩.

这里只考虑机器人在自由空间的控制问题, 故有  $F_e = 0$ . 采用非线性前馈和反馈补偿, 即取  $F_c = H(\theta)u + B(\theta, \dot{\theta})$ , 补偿后的系统方程为

$$\ddot{X} = u$$

采用 PD 控制律, 则基于时间规划的控制输入

$$u = A^d(t) + k_v(V^d(t) - V(t)) + k_p(X^d(t) - X(t)) \quad (10)$$

其中,  $A^d(t), V^d(t)$  和  $X^d(t)$  分别为基于时间规划的机器人的期望加速度、速度和位置.  $k_v$  和  $k_p$  分别为速度和位置反馈增益.

对于非时间参考的运动控制, Tam T. J. 等人的控制律取为

$$u = A^d(s) + k_v(V^d(s) - V(t)) + k_p(X^d(s) - X(t)) \quad (11)$$

其中  $A^d(s), V^d(s)$  和  $X^d(s)$  分别为基于路径长度规划的机器人的期望加速度、速度和位置, 它们可以由(5)和(6)式得到.

对比式(10)和式(11)看到, 非时间参考的控制律和基于时间的控制律在形式上一样的完美, 但仔细分析会发现(11)式存在问题. 我们知道, 稳定的 PID 控制中, 机器人的运动实际上是由误差驱动的, 也就是说, 只有在机器人的期望状态与实际状态之间存在误差时, 机器人才会运动以克服这个误差. 在式(11)中,  $A^d, V^d$  和  $X^d$  是机器人移动的路径长度  $s$  的函数. 机器人从静止到运动的瞬间,  $s = s_0$ , 由规划的边界条件得  $A^d(s_0) = V^d(s_0) = 0$ . 而此时  $V(t) = 0, X^d - X(t) = 0$ , 将它们代入式(11)得到

$$u = 0 \quad (12)$$

这意味着对机器人施加的控制力矩为 0, 机器人不会动作. 机器人不运动,  $s$  就不会增加, 式(12)依然成立. 因此, 控制律(11)无法使机器人产生运动, 这是一个矛盾.

另外,当机器人以较低的速度运行时,如果有个小的扰动,使得机器人在某个控制周期没有向前运动(这是经常发生的),则  $s$  不会增加,下个周期的规划值与当前周期的规划值相同,由此产生的控制力矩相同,那么机器人就会停在当前位置,或者以不连续的速度走走停停.

从上述分析看到,要解决这两个问题,必须在机器人的 PD 控制律之外施加一个产生初始运动并足够克服运动过程中的扰动的能量(力矩).经过分析和设计,我们提出在控制律中增加如下的非线性项

$$P_{bias} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix} \frac{k_0}{1 + \exp(k_1 - k_2|s - s_f|)} \quad (13)$$

式中,  $[\cos\alpha \cos\beta \cos\gamma]^T$  为矢量  $\overline{p_0 p_1}$  在机器人基坐标系  $XYZ$  轴上的方向余弦,它的加入使机器人始终向  $s$  增加的方向运动; $s$  为当前的路径长度, $s_f$  为终点对应的路径长度; $k_0, k_1$  和  $k_2$  为正的标量常数,其中  $k_0$  决定偏值力矩  $p_{bias}$  在总控制力矩中的权重, $k_0$  越大,机器人的抗扰动能力越强,但对轨迹跟踪精度的影响也越大; $k_1$  的作用是当机器人接近终点时,使  $p_{bias} \rightarrow 0$ ,减小它对终点处的控制精度的影响; $k_2$  是路径长度差值的加权系数.不计方向余旋,只看标量部分,取  $k_0=1, k_1=5, k_2=50$ ,并令终点处  $s_f=0.5$ ,作出  $p_{bias}$  的曲线如图 2 所示.从图中看到,当机器人的位置离终点较远时,  $p_{bias}$  近似为一常数,它驱使机器人运动并克服扰动;而当离终点较近时,该项的值接近 0,不影响终点处的定位精度.

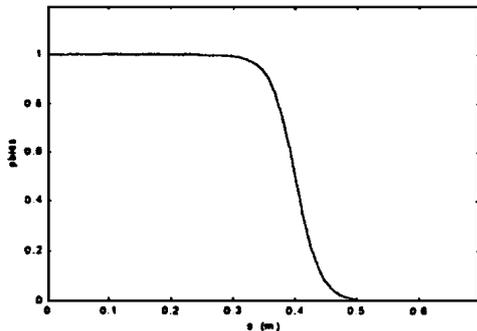


图 2 偏值项示意图

Fig. 2 The bias vs path S

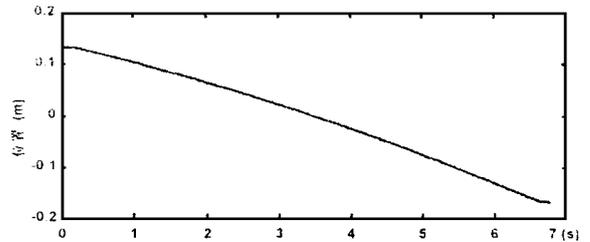
最后带偏值修正的 PD 控制律为

$$u = P_{bias} + A^d(s) + k_v(V^d(s) - V(t)) + k_p(X^d(s) - X(t)) \quad (14)$$

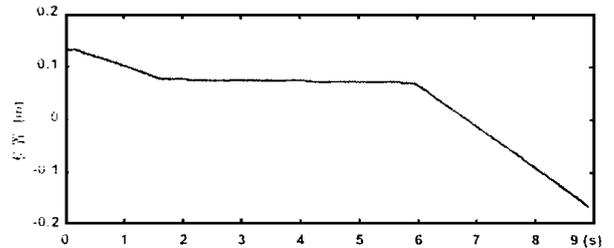
上式看起来不太完美,但却是一个有用的点到点的控制律,它解决了由非时间参考的规划到控制的实现问题.

### 4 实验研究 (Experiment)

本实验主要是验证非时间参考方法的遇障自动停止能力.图 3 给出了机械手在式(5)和(6)的规划值和式(14)的控制律驱动下,沿基坐标的  $Z$  方向(铅垂方向)向下运动 0.3m 的实验情况.实验中的参数为  $u_m = 200, a_m = 0.5\text{m/s}^2, v_m = 0.05\text{m/s}, k_0 = 0.3, k_1 = 2.0, k_2 = 30$ .图 3(a)为机械手在空间自由运动的轨迹跟踪曲线.从图中看到,机械手按最大速度用 7 秒钟完成了路径跟踪;图 3(b)为机械手在运动过程中遇到障碍的情况.从图中看到,机械手在 1.8 秒钟遇到障碍(不用力传感器检测障碍),停止了运动,在 6 秒钟左右,当障碍被移开后,机械手继续沿原路径运动,直到路径的终点.不会出现传统方法遇障使系统瘫痪情况.



(a) 机械手自由运动的轨迹跟踪曲线



(b) 机械手在运动过程中遇到障碍的轨迹跟踪

图 3 非时间参考下机器人遇障自动停止实验曲线

Fig. 3 The trajectory of robot encountering obstacle under non-time based planning and control

### 5 结论 (Conclusion)

本文提出的非时间参考的路径规划与控制方法,使规划器的输出包含了系统的实时信息,减小了机器人遇到障碍时所受的损害,提高了系统对不确定性环境的适应能力和处理意外事件的工作效率.非时间参考的路径规划方法与任务分解、动作调度等结合,将会在很大程度上提高机器人的自主作业能力.

(下转第 19 页)