

文章编号: 1671-7848(2010)03-0388-05

六自由度机械臂轨迹规划与仿真研究

孙亮, 马江, 阮晓钢

(北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124)



摘要: 针对六自由度链式机械臂在进行正运动学、逆运动学以及轨迹规划仿真时, 不易直观地验证运动学算法的正确性和轨迹规划的效果, 在正确建立机械臂数学模型的基础上, 重点分析了机械臂在关节空间中轨迹规划的两种实现方法, 并采用三维运动仿真进行了验证。开发了一套六自由度机械臂三维仿真软件, 该仿真软件在 VC++6.0 开发平台上, 首先利用分割类将基于 MFC 框架的窗口分割成为控制窗口和视图窗口两部分, 然后利用 OpenGL 的图形库对机械臂进行建模, 首次将正运动学、逆运动学以及轨迹规划算法融入其中开发而成。该仿真软件有效地验证了机械臂运动学模型建立的正确性, 同时也对三次多项式和五次多项式两种轨迹规划方法做了直观的比较, 结果表明后一种轨迹规划效果明显优于前一种。

关键词: 机械臂; 运动学分析; 轨迹规划; 运动仿真

中图分类号: TP 241; TP 391 **文献标识码:** A

Trajectory Planning and Simulation of 6-DOF Manipulator

SUN Liang, MA Jiang, RUAN Xiaogang

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Considering that the kinematic algorithm correctness and trajectory planning results are not easy to visually verify for the kinematic analysis, inverse kinematics analysis and trajectory planning simulation on a 6-DOF manipulator, two methods of trajectory planning based on joint space are analyzed. To directly compare the effects of two types of motion planning, a 3D motion simulation software system is developed based on MFC and OpenGL graphic library on VC++6.0 IDE. The forward kinematics, inverse kinematics and trajectory planning algorithm are integrated into the simulation software. The simulation software system of 6-DOF manipulator shows the validity of the kinematics model. The result of trajectory planning methods of the cubic polynomial and the fifth polynomial shows that the later effect of trajectory planning is superior to former one.

Key words: manipulator; kinematics analysis; trajectory planning; motion simulation

1 引言

六自由度链式(6R)机械臂的轨迹规划既可以在关节空间,也可以在直角坐标空间中进行。由于在关节空间中进行轨迹规划是直接受控变量规划轨迹,有着计算量小,容易实时控制,而且不会发生机构奇异性^[1]等优点,所以经常被采用。但是这种方法难以确定各杆和末端抓持器位置,所以开发一套能够直观地监视机械臂各个部分运动的三维仿真软件变得极为重要。文献[2]在 Matlab 平台下开发了 Robotics 工具箱,能够通过函数实现对机器臂进行正、逆运动学以及轨迹规划分析,实现了简单的运动学仿真。文献[3]基于 OpenGL 图形库开发了一套机械臂仿真系统,实现了机械臂的正、逆运动学仿真。文献[4]利用文献[3]的方法,且通过定时器,不断刷新视图,达到了动画的效果,但是并没有提供具体的轨迹规划算法。本文首次将轨迹规划算法融入开发的六自由度

机械臂三维仿真软件中,有效直观地验证了两种插值函数轨迹规划的效果。

2 运动学分析

机械臂坐标系,如图 1 所示。

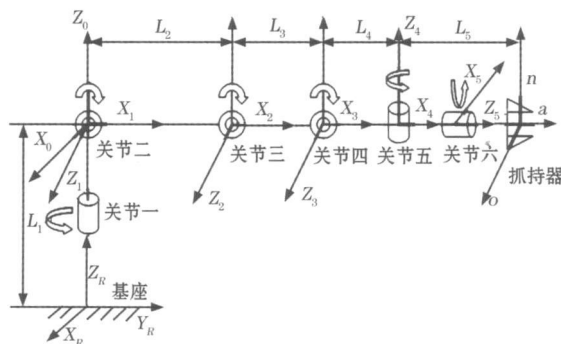


图 1 机械臂坐标系

Fig 1 Coordinate of 6R manipulator

6R 机器臂是具有 6 个关节的空间机构,为描

收稿日期: 2008-10-07; 收修定稿日期: 2009-03-05

基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2007AA04Z226); 国家自然科学基金资助项目(60774077); 北京市教委重点基金资助项目(KZ200810005002)

作者简介: 孙亮(1951-),男,北京人,副教授,研究生,主要从事学习控制,智能系统等方面的教学与科研工作;阮晓钢(1958-),男,教授,博士生导师。

述末端执行器在空间的位置和姿态，可以在每个关节上建立一个坐标系，利用坐标系之间的关系来描述末端执行器的位置。

1) 运动学正解 正运动学的求解过程是根据已知关节变量 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 求末端抓持器 ${}^R T_H = {}^R T_0 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_H = A_0 A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 =$

$$\begin{pmatrix} C_1(C_{234} C_5 C_6 - S_{234} S_5) - S_1 S_2 S_3 C_6 & C_1(-C_{234} C_5 C_6 + S_{234} S_5) + S_1 S_2 S_3 C_6 & C_1(C_{234} S_5) + S_1 C_5 & C_1(C_{234} L_4 + C_{23} L_3 + C_2 L_2) \\ S_{234} S_5 - S_1 S_2 S_3 C_6 & S_{234} C_6 + S_1 S_2 S_3 S_5 & S_1(C_{234} S_5) - C_1 C_5 & S_1(C_{234} L_4 + C_{23} L_3 + C_2 L_2) \\ S_1(C_{234} C_5 C_6 - S_{234} S_5) + C_1 S_2 S_3 S_5 & S_1(-C_{234} C_5 C_6 + S_{234} C_6) - C_1 S_2 S_3 S_5 & S_{234} S_5 & S_{234} L_4 + S_{23} L_3 + S_2 L_2 + L_1 + S_{234} S_3 L_5 \\ S_{234} C_5 C_6 + C_{234} S_5 & -S_{234} C_5 C_6 + C_{234} C_6 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， A_0 为基座坐标系到坐标系 0(关节一)之间的变换矩阵； A_1 为坐标系 0 到坐标系 1 之间的变换矩阵； A_5 为坐标系 5 到坐标系 H 之间的变换矩阵； $S_2 = \sin(\theta_1 + \theta_2)$ ； $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ ； $S_{23} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 。

可以制作关节和连杆参数的表格，见表 1。

表 1 D-H 参数表
Table 1 Parameter table

连杆	变量	d	a	α	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$
1	θ_1	L_1	0	90°	0	1
2	θ_2	0	L_2	0	1	0
3	θ_3	0	L_3	0	1	0
4	θ_4	0	L_4	-90°	0	-1
5	θ_5	0	0	90°	0	1
6	θ_6	L_5	0	0	1	0

2) 运动学逆解 逆运动学的求解过程是根据已知的末端抓持器相对于参考坐标系的位姿，求关节变量 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 的过程，它是机器人运动规划和轨迹控制的基础，也是运动学最重要的部分。先给出机器人的期望位姿表达式：

$${}^R T_H = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(2)为式(1)另一表达形式，向量 n, o, a 分别表示法线(normal)、指向(orientation)和接近(approach)向量； p 向量为末端抓持器坐标系原点相对于基座坐标系的位置向量。

通常， p 可以根据工件位置给出，而 n, o, a 这三个向量可以通过 RPY(滚转角 ϕ_n ，俯仰角 ϕ_o 和偏航角 ϕ_a) 旋转给出。由式(3)表示：

$$\text{RPY}(\phi_a, \phi_o, \phi_n) = \text{Rot}(z, \phi_a) \text{Rot}(y, \phi_o) \text{Rot}(x, \phi_n) = \begin{pmatrix} C_a C_o C_n & C_a S_o C_n & -S_a C_n & C_a C_o \phi_n + S_a S_n & 0 \\ S_a C_o C_n & S_a S_o C_n & -C_a C_n & S_a C_o \phi_n - C_a S_n & 0 \\ -S_o & C_o S_n & C_o C_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

对于式(1)有许多角度的耦合，如 S_{23} ，为了求出单个角度的正切从而算出角度，首先要对其解

器相对于参考坐标系的位姿的过程。使用标准的上关节 D-H 法，将参考坐标系设在 6R 机械臂的基座上，从基座开始变换到第一节，然后到第二节，...，最后变化到末端抓持器。6R 机械臂的基座和手之间的总变换为

耦，可以通过式(1)中 ${}^R T_H$ 矩阵左乘 A_0^{-1} 矩阵，使得方程右边不包含这个角度。为了计算简便将关节一和关节二以及关节五和关节六合在一起，其结构，如图 2 所示。

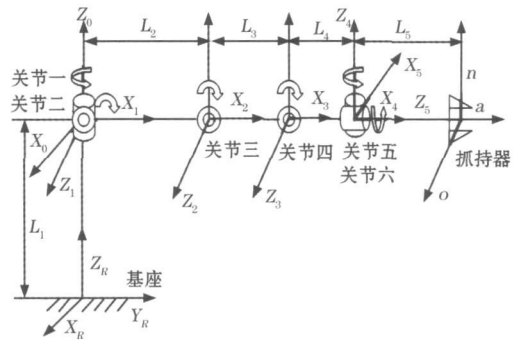


图 2 修改过后的 6R 机械臂坐标
Fig 2 Modified coordinate of 6R manipulator

那么 6R 机械臂的基座和手之间的总变换为

$${}^R T_H = {}^R T_0 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_H = A_0 A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 =$$

$$A_0 = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_H = {}^5 T_H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

将上式左乘 A_0^{-1} 然后再右乘 A_H^{-1} 可得：

$$A_0^{-1} {}^R T_H A_H^{-1} = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x - a_x L_5 \\ n_y & o_y & a_y & p_y - a_y L_5 \\ n_z & o_z & a_z & p_z - L_1 - a_z L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

依次左乘 $A_1^{-1}, A_2^{-1}, A_3^{-1}, A_4^{-1}, A_5^{-1}$ 得到不同的等式从而得出各个关节转角，得：

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y - a_y L_5}{p_x - a_x L_5}\right) \text{ 或 } \theta_1 = \theta_1 + 180^\circ \quad (6a)$$

$$\theta_{234} = \arctan\left(\frac{a_x}{C_1 a_x + S_1 a_y}\right) \text{ 或 } \theta_{234} = \theta_{234} + 180^\circ$$

$$C_3 = \frac{[(R_x - a_x L_y) C_1 + (R_y - a_y L_y) S_1 - C_{234} L_4]^2 + [R_z - L_r - a_z L_y - S_{234} L_4]^2 - L_z^2 - L_y^2}{2 L_z L_y}$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{(C_3 L_y + L_z)(R_z - L_r - a_z L_y - S_{234} L_4) - (C_3 L_y + L_z)[(R_x - a_x L_y) C_1 + (R_y - a_y L_y) S_1 - C_{234} L_4] + S_3 L_y [(R_x - a_x L_y) C_1 + (R_y - a_y L_y) S_1 - C_{234} L_4]}{S_3 L_y (R_z - L_r - a_z L_y - S_{234} L_4)} \quad (6b)$$

θ_2 在 -90° 到 $+90^\circ$ 之间, 所以不存在 $180^\circ + \theta_2$ 。
 $S_3 = \pm(1 - C_3^2)^{1/2}$; $\theta_3 = \arctan\left(\frac{S_3}{C_3}\right)$ (6c)

θ_3 在 -90° 到 $+90^\circ$ 之间, 所以不存在 $180^\circ + \theta_3$ 。
 $\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3$ (6d)

θ_4 在 -90° 到 $+90^\circ$ 之间, 所以不存在 $180^\circ + \theta_4$ 。
 $\theta_5 = \arctan \frac{C_{234} (C_1 a_x + S_1 a_y) + S_{234} a_z}{S_1 a_x - C_1 a_y}$ (6e)

θ_5 在 -90° 到 $+90^\circ$ 之间, 所以不存在 $180^\circ + \theta_5$ 。
 $\theta_6 = \arctan \frac{-S_{234} (C_1 n_x + S_1 n_y) + C_{234} n_z}{-S_{234} (C_1 q_x + S_1 q_y) + C_{234} q_z}$ (6f)

根据式 (6) 求解的关节转角, 可知 6R 机械臂在相同的位姿下可能存在 2^3 种关节转角组合。这就需要根据机器人的实际机构选取一种最优的解 (如功率最省、行程最短、受力最好、回避障碍) 这里在仿真软件算法中选择功率最省的标准。也就是说 6R 机械臂末端抓持器从初始位姿到下一个路径点位姿各旋转关节角变化量的平方和最小的那组解。如下:

$$\min_{j=1, \dots, 8} \sum_{i=1}^6 (\theta_{ij}^T - \theta_{ij}^S)^2 \quad (7)$$

其中, θ_{ij}^T 中的 $i (i=1, 2, \dots, 6)$ 表示初始位姿的 6 个旋转关节角, $j (j=1, 2, \dots, 8)$ 表示 1 个旋转关节角的 8 种可能。 θ_{ij}^T 表示在起始位姿下关节转角 i 的第 j 个特解。同理 θ_{ij}^S 表示在下一个路径点位姿下关节转角的第 j 个特解。

上面是对于一个路径点角度逆解的推导过程, 至于多路径点的情况中的角度信息, 每个逐一通过式 (6) 和式 (7) 来表示。

3 轨迹规划

为了求得在关节空间的轨迹, 首先利用逆运动学方程将路径点转换成关节角度值, 然后分别对每一个关节变量映射成一个光滑时间函数, 使之从起始点开始, 依次通过所有路径点, 最后达到目标点。每个关节时间函数之间是相互独立的, 但是总的运动时间是相同的。本文光滑时间函数采用三次多项式以及五次多项式函数。

1) 三次多项插值 三次多项式及其一阶导数函数, 共有 4 个待定系数, 同时对起始点和目标点的角度和角加速度给出约束条件, 列出 4 个方程如下:

$$\begin{aligned} \theta_{(b)} &= C_0, \quad \theta_{(p)} = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 \\ \dot{\theta}_{(b)} &= C_1, \quad \dot{\theta}_{(p)} = C_1 + 2C_2 t + 3C_3 t^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\theta_{(b)}$, $\theta_{(p)}$ 分别表示起始点和目标点的关节角; $\dot{\theta}_{(b)}$, $\dot{\theta}_{(p)}$ 分别表示起始点和目标点的关节角速度。

当 $t=0$ 解得系数为

$$\begin{cases} C_0 = \theta_{(0)}, \quad C_2 = \frac{3(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(0)}) - (2\theta_{(0)} + \theta_{(p)}) \ddot{\theta}}{\ddot{\theta}} \\ C_1 = \dot{\theta}_{(0)}, \quad C_3 = \frac{-2(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(0)}) + (\theta_{(0)} + \theta_{(p)}) \ddot{\theta}}{\ddot{\theta}} \end{cases} \quad (9)$$

当 $\theta_{(0)} = 0$ $\dot{\theta}_{(p)} = 0$ 时, 得到特解如下:

$$C_1 = 0, \quad C_2 = \frac{3(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(0)})}{\ddot{\theta}}, \quad C_3 = \frac{-2(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(0)})}{\ddot{\theta}} \quad (10)$$

2) 五次多项插值 五次多项式及其一阶、二阶导数函数, 共有 6 个待定系数, 同时对起始点和目标点的角度、角速度和角加速度给出约束条件, 列出 6 个方程如下:

$$\begin{aligned} \theta_{(b)} &= C_0, \quad \theta_{(p)} = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 + C_3 t^3 + C_4 t^4 + C_5 t^5 \\ \dot{\theta}_{(b)} &= C_1, \quad \dot{\theta}_{(p)} = 2C_2, \quad \dot{\theta}_{(p)} = 2C_2 + 6C_3 t + 12C_4 t^2 + 20C_5 t^3 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\theta_{(b)}$, $\theta_{(p)}$ 分别为起始点和目标点的关节角; $\dot{\theta}_{(b)}$, $\dot{\theta}_{(p)}$ 分别为起始点和目标点的关节角速度; $\ddot{\theta}_{(b)}$, $\ddot{\theta}_{(p)}$ 分别为起始点和目标点的关节角加速度。

当 $t=0$ 解得系数如下:

$$\begin{aligned} C_0 &= \theta_{(b)}, \quad C_1 = \dot{\theta}_{(b)}, \quad C_2 = \frac{\ddot{\theta}_{(b)}}{2} \\ C_3 &= \frac{20(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(b)}) - (8\ddot{\theta}_{(p)} + 12\ddot{\theta}_{(b)}) \ddot{\theta} - (3\ddot{\theta}_{(b)} - \ddot{\theta}_{(p)}) \ddot{\theta}^2}{2\ddot{\theta}^3} \\ C_4 &= \frac{-30(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(b)}) + (14\ddot{\theta}_{(p)} + 16\ddot{\theta}_{(b)}) \ddot{\theta} + (3\ddot{\theta}_{(b)} - 2\ddot{\theta}_{(p)}) \ddot{\theta}^2}{2\ddot{\theta}^4} \\ C_5 &= \frac{12(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(b)}) - 6(\ddot{\theta}_{(p)} + \ddot{\theta}_{(b)}) \ddot{\theta} - (\ddot{\theta}_{(b)} - \ddot{\theta}_{(p)}) \ddot{\theta}^2}{2\ddot{\theta}^5} \end{aligned} \quad (12)$$

当 $\theta_{(b)} = 0$ $\dot{\theta}_{(b)} = 0$ $\theta_{(p)} = 0$ $\dot{\theta}_{(p)} = 0$ 时, 得到特解如下:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0, \quad C_2 = 0, \quad C_3 = \frac{10(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(b)})}{\ddot{\theta}} \\ C_4 &= \frac{-15(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(b)})}{\ddot{\theta}}, \quad C_5 = \frac{6(\dot{\theta}_{(p)} - \dot{\theta}_{(b)})}{\ddot{\theta}} \end{aligned} \quad (13)$$

4 仿真系统和实验

仿真系统采用 MFC 框架类和 OpenGL 的图形库进行开发。MFC 是微软提供的基础类库, 是一套面向对象的函数库, 以类的方式提供给用户使用, 利用这些类可以有效地帮助用户完成基于 Windows 的应用程序开发。OpenGL 是在 SG 等多家著名的计算机公司的倡导下, 以 SG 的 GL 三维图形库为基础制定的一个通用共享的开放式三维图形标准。它是一种与硬件、窗口系统和操作系统相独立的一

系列 API 由于 OpenGL 具有编程建模、容易实现高度清晰感的实时三维仿真等优点，它逐渐被广泛应用于机器人臂的设计和运动仿真中。

1) 仿真系统开发过程

① 利用 MFC API `Wizrd` 建立一个单文档应用程序。

② 在资源管理器中插入控制面板对话框，建立一个基于 `CFormView` 类的 `CFormandView` 类，在 `CMainFrame` 类的定义中声明一个 `CSPliteWnd` 类的对象 `m_wndSPliteR` 完成 `CMainFrame` 类的 `OnCreateClient` 事件处理程序。

③ 在控制面板对话框内的每个控件编写事件处理函数，包括按钮、静态编辑框和滚动条等，完成与视窗类的数据交换。

④ 在视窗类 `CAmView` 中添加图形绘制程序。

a) 首先设置像素格式并创建 `OpenGL` 绘制描述表，在 `CAmView` 类中添加 `WM_CREATE` 消息，然后编写 `OnCreate` 事件处理程序。b) 然后在类 `CAmView` 的成员函数 `OnDraw` 中，添加 6R 机械臂绘制程序。包括机械臂的建模、材质、光源位置、背景色、视角程序等。c) 然后在 `CAmView` 类中添加键盘 `WM_KEYDOWN` 消息，然后编写 `OnKeyDown` 事件处理程序。

⑤ 加入正运动学算法、逆运动学算法，以及运动轨迹规划算法。

⑥ 在 `CAmView` 类中添加定时器 `WM_TIMER` 消息，然后编写 `OnTimer` 事件处理程序。使用 `SetTimer` 函数设置定时器的序号和计时周期。这样可以生成动画，为了避免显示动画时闪动，采用双缓存，通过 `SwapBuffers` 函数来实现。6R 机械臂仿真软件包括 1. 正运动学仿真、逆运动学仿真、抓小球仿真和系统设置四部分，如图 3 所示。

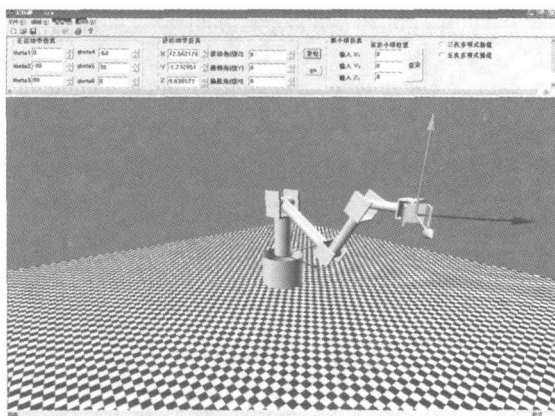


图 3 6R 机械臂运动仿真软件

Fig 3 Motion simulation software of 6R manipulator

2) 仿真试验 按照结构图 1 的比例，编程建模时取 $l_1 = 8.2$ $l_2 = 7.0$ $l_3 = 5.0$ $l_4 = 3.0$ $l_5 = 2.0$ 这里 l_1 可以用 OpenGL 提供的画圆柱函数 `gluCylinder` (`obj, 3.0, f 3.0, f 8.200, f 100`) 实现，其中，`obj` 表示材质，`3.0` 表示杆 2 个截面的半径，

8.200 表示杆长。单位是 Windows 窗口定义的像素。其他杆，同理画出，如图 4 所示。

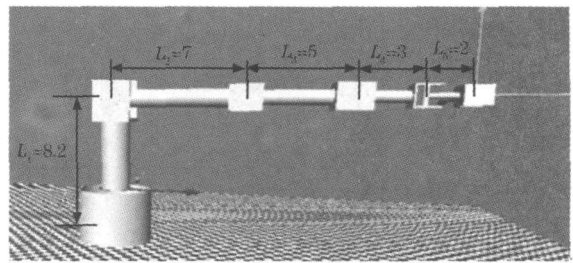


图 4 各杆尺寸

Fig 4 The dimension of the manipulator

设置起始点位姿，中间路径点，及目标点，如图 5 所示。



图 5 起始点位姿，目标点及中间路径点

Fig 5 The starting point position and orientation, the target point and intermediate path points

图中， X Y Z 对应的编辑框表示抓持器的位置，滚动角、俯仰角和偏航角的编辑框表示抓持器的姿态。仿真时起始点和目标点的关节角速度、加速度设为零，而中间点的路径点的关节角速度、加速度可以根据末端抓持器在直角坐标空间中的瞬时线速度和角速度以及线加速度和角加速度来确定每个路径点的关节角速度和角加速度，但是该方法工作量太大，故采用适当的启发式方法来确定，取相邻两段轨迹角速度和角加速度的平均值作为中间点的瞬时速度。起始点、中间点、目标点各个关节角速度、角加速度分别见表 2 表 3。

表 2 关节角速度

Table 2 Joint angular velocity

点	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
起始点	0	0	0	0	0	0
中间点 1	-0.25	10.8	-1.85	-8.95	-4.75	0
中间点 2	-2.95	8.2	5.75	-13.95	-7.05	0
终点	0	0	0	0	0	0

表 3 关节加速度
Tab 3 Joint angular acceleration

点	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
起始点	0	0	0	0	0	0
中间点 1	-1.475	4.1	2.875	-6.975	-3.525	0
中间点 2	0.125	-5.4	-0.925	4.475	2.375	0
终点	0	0	0	0	0	0

要求机械臂从起始点开始运动, 1 后到达中间点 1, 2 后到达中间点 2, 3 时到达终点, 利用三次多项式和五次多项式进行每 50 ms 完成一次关节空间插值运算, 采用 Matlab 绘制曲线, 篇幅限制这里只给出关节三的角度、角速度、角加速度曲线, 如图 6 所示。

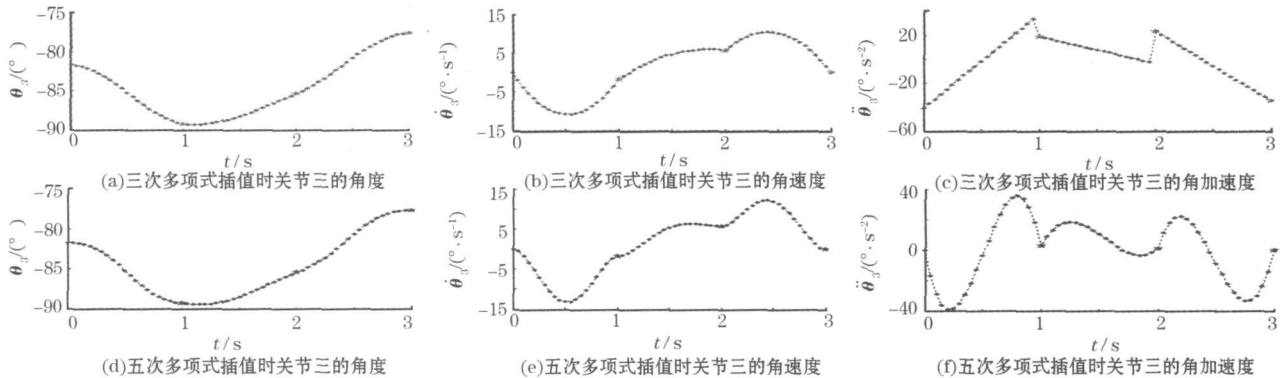


图 6 关节三的角度、角速度及角加速度

Fig 6 The angle, angular velocity and angular acceleration of joint 3

对应的 6R 机械臂三维仿真, 如图 7 所示。

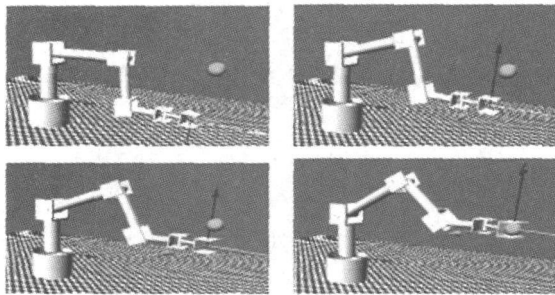


图 7 三维运动仿真

Fig 7 3D motion simulation

小球位置为目标点, 各图自左向右, 依次为起始点、中间点 1、中间点 2 和目标点。

仿真试验时选择单选框三次多项式插值, 然后按下“go”按钮。同样的操作选择单选框五次多项式插值, 然后按下“go”按钮, 如图 8 所示。

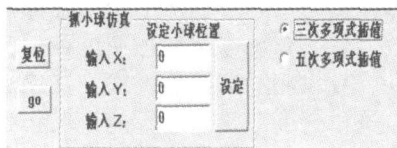


图 8 仿真控制台

Fig 8 Simulation console

对比这两种多项式插值结果, 可以发现, 三次多项式的计算量比较小, 可以保证关节角、角速度都是连续的, 见图 6(a)和 6(b), 满足一般的轨迹规划要求, 但是, 角加速度不一定能保证连续, 见图 6(c), 所以关节的电机可能会受到一定的冲击; 五次多项式的计算量相对来说大一些, 但是可以保证各个点的关节角、角速度、角加速度都是连续

的, 见图 6(d), 6(e), 6(f), 从而使电机平稳的运行。

5 结 语

本文对 6R 机械臂进行了运动学分析, 重点讨论了在关节空间中对 6R 机械臂进行运动轨迹规划的两种插值时间函数。在 VC++6.0 开发平台上, 基于 MFC 和 OpenGL 开发了一套 6R 机械臂的仿真软件。通过仿真软件有效地验证了机械臂运动学模型建立的正确性, 同时首次将轨迹规划算法融入仿真平台, 对三次多项式和五次多项式两种轨迹规划方法做了直观的比较, 结果表明后一种轨迹规划效果明显优于前一种。在实际工业生产中, 机械臂的使用非常频繁, 对于未知构型的机械臂如果通过实物来验证其运动学算法的正确性和轨迹规划的效果, 必然会造成开发周期变长, 导致成本过高, 且还可能遇到一些不可预测的问题。通过该仿真软件可解决具体构型机械臂开发和应用中的这些问题。

参考文献 (References)

- [1] Bunkie S. Introduction to robotics analysis systems applications [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry 2004.
- [2] Cooke P I. A robotics toolbox for Matlab [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine 1996 3(1): 24-32.
- [3] Kim S H, Kim Y H. Realization of a virtual simulator system on Windows 98/NT [J]. Industrial Electronic 2001, 1: 216-220.
- [4] 严勇杰, 朱齐丹, 蒋丞. 基于 OpenGL 的机械臂控制系统仿真平台研究 [J]. 计算机仿真, 2006 8(23): 252-257. (Yan Yongjie, Zhu Qidan, Jiang Cheng OpenGL based experimental platform for simulation of robot arm control system [J]. Computer Simulation 2006 8(23): 252-257.)
- [5] 乔林, 费广正. OpenGL 程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社 2000. (Qiao Lin, Fei Guangzheng OpenGL Programming [M]. Beijing Tsinghua University Press 2000.)