

基于 MATLAB-Robotics 工具箱的工业机器人轨迹规划及仿真研究

于天宇^a, 李达^b, 宋宝玉^b

(哈尔滨工业大学 a.英才学院 b.机电工程学院机械设计系 哈尔滨 150001)

摘要 对 Cincinnati T3-746 工业机器人的运动学轨迹规划进行了分析与仿真。通过实验对该工业机器人的三关节的关节轨迹进行了三次多项式插值运算。利用 MATLAB-Robotics 工具箱对该工业机器人进行了建模,实现了对工作空间内任意直线、圆弧轨迹拟合插值运算。通过运动学正反解的计算,得到了实时的关节空间坐标的数值解。为该工业机器人进一步的研究和应用提供了理论分析依据。

关键词 工业机器人;轨迹规划;MATLAB;Robotics 工具箱

中图分类号:TH16;TP242

文献标识码:A

文章编号:1002-2333(2011)07-0081-03

Research on Trajectory Planning and Simulation of Industrial Robots Based on MATLAB-Robotics Toolbox

YU Tian-yu^a, Li-da^b, SONG Bao-yu^b

(a. Honors School b. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The paper analyzed and simulated on kinematic trajectory planning of industrial robots Cincinnati T3-746. Cubic polynomial interpolation and experimental method was used in joint trajectory planning on this robot. This experiment modeled on this robot, realized trajectory fitting and interpolation of any straight line and circular curve in working area by using MATLAB-Robotics Toolbox. By using kinematics and inverse kinematics solutions, this experiment gets real-time numerical solution in joint space coordinates. It provided theoretical basis for further research and application on industrial robots.

Key words: industrial robots; trajectory planning; MATLAB; robotics toolbox

1 引言

机器人学中的一个基本问题是为解决某个预定的任务而规划机器人的动作,然后在机器人执行完成那些动作所需的命令时控制它。机器人轨迹规划属于机器人低层规划,是在机械手运动学和动力学的基础上,讨论机器人运动的规划及其方法。所谓轨迹,就是机器人在运动过程中的位移、速度和加速度。面向笛卡尔空间轨迹优化的优点是概念直观,而且沿预定直线路径可达到相当的准确性,而像 Cincinnati T3-746 这样的工业机器人可用的控制算法与实际控制操作都是建立在关节坐标系当中的。因此,笛卡尔空间路径规划需要在笛卡尔坐标和关节坐标之间进行实时变换。

为了实现对工作空间内任意直线、圆弧轨迹拟合插值运算,从而使 Cincinnati T3-746 机器人实现点焊、弧焊以及写字的功能,首先对该工业机器人的腰关节、肩关节和

肘关节的关节坐标与开发软件从旋转变压器中所读值进行三次多项式插值,将其所得出的结果与试验结果比较。利用 MATLAB-Robotics 工具箱对 Cincinnati T3-746 机器人改装后的写字机器人进行建模,分别对工作空间内直线和圆弧曲线进行了轨迹规划,通过运动学正反解得到了实时的关节空间坐标的数值解,再与之前得出的三次多项式插值拟合曲线标定得出各个关节旋转变压器的读数反输入至控制器,则完成驱动机器人按规划的轨迹运动。

MATLAB-Robotics 工具箱将纷繁复杂的运动学正反解数值运算简单高效化,为该机器人的轨迹优化提供了便利,验证了 Cincinnati T3-746 机器人改装后的写字机器人在工作空间中运动轨迹的正确性与合理性。

2 Cincinnati T3-746 机器人建模

2.1 Cincinnati T3-746 机器人的基本结构

Cincinnati T3-746 是一种精密的垂直多关节型工业

(2)配研滑动轴承轴向调整垫,保证滑动轴承轴向间隙为 0.02mm。

装配完成后,磨头主轴空运转 4h,检查主轴的温升、主轴径向跳动、轴向窜动达到出厂精度要求。试磨 CS6140 系列床身导轨面,明暗相间的振纹消失。经过半年多的观察,机床运行正常,振纹现象再未出现。

6 结论

对于采用多楔式动静压滑动轴承的导轨磨床,轴承的半径间隙过大,导致的轴承的油膜压力 p 、承载力 P 和油

膜静刚度 K 大幅度下降是产生磨削振纹主要因素之一。

[参考文献]

- [1] 机械设计手册编委会.机械设计手册(机械零部件与传动设计卷)[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 机床设计手册编委会.机床设计手册(下册)[M].北京:机械工业出版社,1980. (编辑 立明)

作者简介 郭宝林(1972-)男,高级工程师,工程硕士学位,研究方向为机械制造。

收稿日期 2011-03-17



图1 Cincinnati T3-746 机器人实物图

机器人。它具有6个全旋转关节,即具有6个自由度,原设计采用直流伺服电机驱动,轨迹规划实验应用了腰关节、肩关节和肘关节3个关节外加悬吊的一只笔,可以看作是第4根固定连杆。它的设计

具有传动精度较高、结构紧凑、工作空间大、适应性好,广泛应用于机械工业领域,可用来从事搬运、喷涂、焊接等工作。其实物结构如图1所示。

2.2 Cincinnati T3-746 机器人的 MATLAB 建模

改进形式 D-H 方法的 4×4 齐次变换矩阵为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表1 机器人的连杆参数和关节变量

| i | d_i | α_{i-1} | a_i | θ_0 | 变量 θ_i |
|-----|-------|----------------|-------|------------|---------------------------------------|
| 1 | 0 | 0° | 0 | -90° | $\theta_1(-135^\circ \sim 135^\circ)$ |
| 2 | 0 | 90° | 0 | 90° | $\theta_2(-120^\circ \sim -30^\circ)$ |
| 3 | 0 | 0° | a_2 | 0° | $\theta_3(-45^\circ \sim 45^\circ)$ |
| 4 | d_4 | 90° | 0 | 0° | $\theta_4(-180^\circ)$ |
| 5 | 0 | 90° | a_4 | 0° | $\theta_5(-180^\circ \sim 180^\circ)$ |

计算 Cincinnati T3-746 机器人的连杆参数与关节变量见表1,表中 a_i 为沿 x_i 轴、 z_i 到 z_{i+1} 的距离, α_{i-1} 为绕 x_i 轴、 z_i 到 z_{i+1} 的角度, d_i 为沿 z_i 轴、 x_{i-1} 到 x_i 的距离, θ_i 为绕 z_i 轴、 x_{i-1} 到 x_i 的角度。MATLAB 函数 Link 中连杆的前4个元素依次是 α 、 a 、 θ 、 d ,第5个参数0代表转动关节、1代表移动关节,Modified 表示改进的 D-H 方法。

表1中 $a_2=1150\text{mm}$ 、 $a_4=-188\text{mm}$ 、 $d_4=1466\text{mm}$ 。经计算:

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -d_4 \\ 1 & 0 & 0 & a_2+a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1466 \\ 1 & 0 & 0 & 962 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

利用 MATLAB 中的 Link 函数进行机器人建模:

```
L{1}=link([0 0 -pi/2 0 0], 'mod');
L{2}=link([pi/2 0 pi/2 0 0], 'mod');
L{3}=link([0 1150 0 0 0], 'mod');
L{4}=link([pi/2 0 0 1466 0], 'mod');
L{5}=link([pi/2 -188 0 0 0], 'mod');
hithd=robot(L, 'hithdrobot'); %建立机器人模型
clear L
```

hithd.name='hithdrobot';

drivebot(hithd)%驱动机器人模型生成

机器人结构简图与 MATLAB 建模如图2。

3 关节坐标插值与实验标定

3.1 软件系统对关节坐标的数据读取

实验对 Cincinnati T3-746 机器人腰关节、肩关节和肘关节的关节角旋转变压器反馈值进行了测量。对于腰

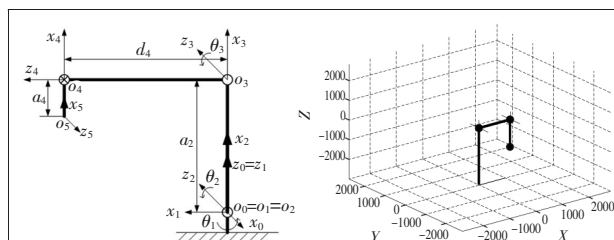


图2 Cincinnati T3-746 机器人结构简图与 MATLAB 建模图

关节从 0°至 105°每隔 15°测量所得到的 8 组数据分别为 0x66A8、0x5AAE、0x4EAB、0x3EC5、0x2EDD、0x20F1、0x16F9、0x0D0E。对于肩关节从 -90°至 -30°每隔 10°测量所得到的 7 组数据分别为 0x7F31、0x7932、0x733A、0x6B3A、0x653A、0x5F32、0x5730。对于肘关节从 0°至 -40°每隔 10°测量所得到的 5 组数据分别为 0xBEDE、0XC66D、0xCC47、0xD226、0xDA0D。

3.2 利用 MATLAB 对实验数据进行拟合计算

利用 Polyfit、Polyval、Interpl 函数对关节角度进行三次多项式插值和最小二乘法实验数据测量比较,实验结果如图3。

通过三次多项式插值和最小二乘法实验数据测量比较,可以看出曲线拟合效果比较理想,可以利用拟合出的曲线来求解各个关节点的坐标值,从而为后续的空间直线、曲线轨迹规划提供了实验数据基础。

4 空间直线、曲线轨迹拟合

4.1 空间直线拟合规划

机器人初始状态的关节坐标为 $q_1=[0 \text{ } \pi/2 \text{ } 0 \text{ } 0 \text{ } 0]$,利用运动学正解函数 $T1=fkine(hithd, q1)$ 可以求得机器人初始状态的齐次变换矩阵为:

$$T_{\text{初始}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1466 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 962 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于机器人写字空

间轨迹规划过程中末端悬吊的笔始终与基坐标系 XY 平面垂直,空间位姿保持不变,也就是说末端连杆的齐次变换矩阵的位姿矩阵保持不变,即上述矩阵的左上角 3×3 矩阵在空间轨迹规划过程中保持不变。

利用 MATLAB 画一条平行于水平面的横线,各个关

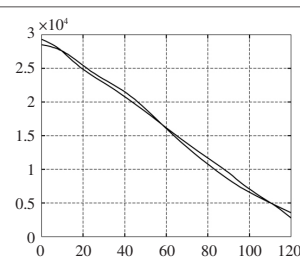


图3 机器人腰关节关节坐标曲线拟合

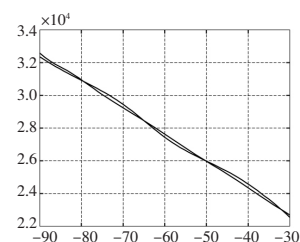


图4 机器人肩关节关节坐标曲线拟合

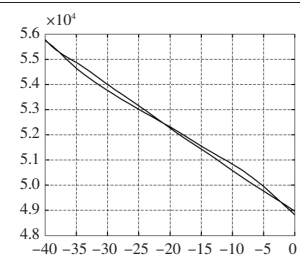


图5 机器人肘关节关节坐标曲线拟合

节实现联动 程序如下:

```
i=0:3:30;
T1=[0 1 0 2025.5 0 0 1 0; 1 0 0 -230 0 0 0 1];%设定初始齐次变换矩阵
T2=[0 1 0 2025.5 0 0 1 i(:,11); 1 0 0 -230 0 0 0 1];%设定终止齐次变换矩阵
ta=[0:0.01:2]';%给定模拟仿真时间
Ta=ctrj(T1,T2,length(ta));%创建笛卡尔坐标系直线轨迹
tic;
q=ikine(hithd,Ta);%运动学逆解出关节坐标
toc
%画出腰关节、肩关节和肘关节关节坐标运动曲线
subplot(3,1,1)
plot(ta,q(:,1))
xlabel('Time (s)');
ylabel('Joint 1 (rad)');
subplot(3,1,2)
plot(ta,q(:,2))
xlabel('Time (s)');
ylabel('Joint 2 (rad)');
subplot(3,1,3)
plot(ta,q(:,3))
xlabel('Time (s)');
ylabel('Joint 3 (rad)');
hold on
pause%暂停,按任意键继续
```

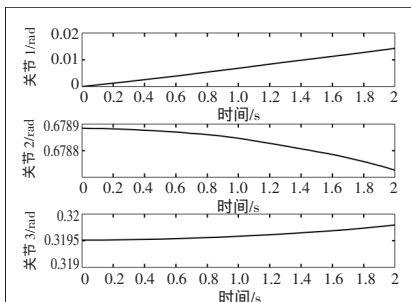


图6 画直线轨迹时机器人腰关节、肩关节和肘关节关节坐标运动曲线

肘关节关节坐标运动曲线如图6所示。

从仿真结果中可以看出,在匀速画一条平行于水平面的横线过程中腰关节、肩关节和肘关节的相应运动情况,腰关节匀速正方向旋转、肩关节和肘关节分别正反向运动保证机器人末端始终处于一个平面内。

4.2 空间圆弧拟合规划

利用 MATLAB 画一条平行于水平面的半圆曲线,圆心坐标为(2022.5,30),半径为30,各个关节实现联动 程序如下:

```
alpha=0:pi/80:2*pi;%定义圆弧角
R=30;%给定半径
a1=2022.5+R*sin(alpha);%定义x变量
b1=30-R*cos(alpha);%定义y变量
for i=1:1:40
T{i}=[0 1 0 a1(i); 0 0 1 b1(i); 1 0 0 -230; 0 0 0 1];%定义半圆弧上40个点的齐次变换矩阵
end
for i=1:1:40
```

```
T{i}=[i:0.025:i+1]';
Ta{i}=ctrj(T{i},T{i+1},length(T{i}));%生成40个线段的笛卡尔轨迹
end
for i=1:1:40
tic;
q{i}=ikine(hithd,Ta{i});%运动学逆解40个线段的关节坐标
toc
end
```

之后利用 subplot 函数画出腰关节、肩关节和肘关节关节坐标运动曲线如图7所示。

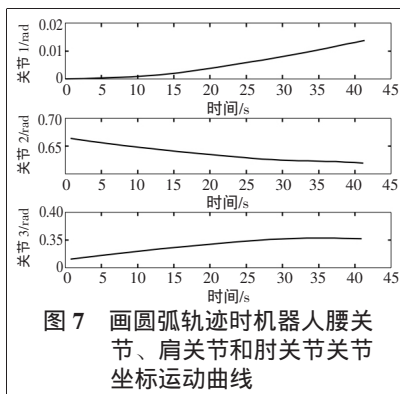


图7 画圆弧轨迹时机器人腰关节、肩关节和肘关节关节坐标运动曲线

从仿真结果中可以得到任意时刻绘制圆弧曲线时各个关节的关节坐标,与之前得出的三次多项式插值拟合曲线标定,得出各个关节旋转变压器的读数,将这些读数输入控制软件,则完成驱动机器人拟合圆弧曲线的轨迹运动。

5 结论

通过 MATLAB-Robotics 工具箱对 Cincinnati T3-746 机器人改装后的写字机器人进行建模,提高了具体的空间轨迹规划的可操作性和可视性。通过三次多项式插值和最小二乘法实验数据测量比较,得到了比较理想的曲线拟合效果,可以利用拟合出的曲线来求解各个节点的坐标值,为空间直线、曲线轨迹规划提供了实验数据基础。通过 MATLAB 编程进行运动学正反解的运算,实现了对工作空间内任意直线、圆弧轨迹拟合插值运算,通过运动学正反解得到了实时的关节空间坐标的数值解,从而为 Cincinnati T3-746 机器人实现工作空间任意曲线运动提供了编程算法与理论基础。实验过程中将空间轨迹数值解与之前得出的三次多项式插值拟合曲线标定,得出各个关节旋转变压器的读数反输入至控制器,则完成驱动机器人按规划的轨迹运动。

[参考文献]

- [1] CORKE P. Machine Vision Toolbox [J]. IEEE Robotics and Automation, 2005(12):16-25.
- [2] 蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2000.
- [3] 李延富.CINCINNATI 机器人运动学和动力学的研究与仿真分析[D].沈阳:东北大学,2005.
- [4] 马如奇,郝双晖,郑伟峰,等.基于 MATLAB 与 ADAMS 的机械臂联合仿真研究[J].机械设计与制造,2010(4):93-95.
- [5] 王旭东.CINCINNATI MILACRON T<3>工业机器人开放式控制系统设计分析与基础研究[D].沈阳:东北大学,2005.
- [6] 吴伟国,赵洋.仿人四指灵巧手的抓持能力分析[J].机械设计与制造,2010(4):188-190.

(编辑 立 明)

作者简介:于天宇(1987-),男,哈尔滨工业大学英才学院本科生,研究方向为工业机器人系统控制;

宋宝玉,男,教授,博士生导师,研究方向为纳米润滑材料理论及应用、新型滑动轴承技术、先进装备设计理论与方法等。

收稿日期:2011-04-27