

一种三自由度冗余驱动并联机器人控制研究

刘保朝¹, 陈能祥²

(1. 陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 深圳市元创兴科技有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要: 并联机器人一般由多条运动轴组成, 具有响应快、刚性好、精度高等优点, 但是由于其机械结构的复杂性导致其也存在明显缺点, 如各支链之间存在相互耦合使得工作区域内存在奇异位形, 加入冗余度可以消除奇异位形从而改善它的几何特性, 冗余并联机器人作为一种新型的机器人形式得到了越来越多的重视, 基于三自由度冗余驱动并联机器人提出一种控制研究方法, 主要从冗余并联机器人的运动学模型、工作空间、MATLAB 仿真及其控制软件开发等主要方面进行了深入细致的研究。

关键词: 冗余驱动; 并联机器人; 运动学模型; MATLAB 仿真; 控制软件

A Three—Degree—Of—Freedom Redundant Drive Parallel Robot Control Research

Liu Baochao¹, Chen Nengxiang²

(1. Shaanxi Polytechnic Institute, Xiayang 712000, China;

2. Shenzhen Reinovo Technology Co., Ltd., Shenzhen 518055, China)

Abstract: Parallel robot usually consists of multiple axes, has advantages of fast response, good rigidity and high precision, but also due to the complexity of its mechanical structure exists obvious shortcoming, such as the mutual coupling between the branched chain makes the work area is the singular form, add redundancy can eliminate singular configuration so as to improve its geometric features, redundant parallel robot as a new form of robot has attracted more and more attention, based on the 3-dof redundant drive put forward a kind of parallel robot control methods, mainly from main aspects: the redundant parallel robot kinematics model, the workspace, Matlab simulation and its control software development carried on the thorough careful research.

Keywords: redundant drive; parallel robot; kinematics; workspace; control software

0 引言

并联机器人作为近年来机器人研究热点之一, 目前其应用几乎涉及现代尖端技术的各个领域^[1], 如应用于航空航天运载工具模拟器、卫星跟踪系统及飞船对接器等, 从机构选型角度看, 凡是需要把转动、移动或其复合运动转化成空间复杂运动的场合都有应用并联机器人机构的潜在可能性。从这一角度讲, 并联机器人在未来获得更为广泛的应用是毋庸置疑的。

三自由度冗余驱动并联机器人作为一种创新型并联机器人, 是一个由三个并行链构成的闭链运动系统, 即末端执行器通过三个独立运动链与机座相连。其结构上具有低惯量、大负载能力、高速高精度等优点, 而且在工作空间中不存在奇异位形, 运动学性能和动力学性能均优于非冗余机构, 在精密仪器、现代机床、高速自动化生产线等领域有着广阔的应用前景。

1 系统运动学分析

机器人控制就是控制机器人各连杆、各关节等彼此之

间的相对位置和各连杆、各关节的运动速度以及输出力的大小, 因此下面进行三自由度冗余驱动并联机器人的运动学分析^[2-4]。

并联机器人运动学分析主要包括运动学正解分析、运动学反解分析及工作空间确定, 运动学分析是并联机器人轨迹规划控制中的研究重点, 由于并联机器人比较特殊的机械结构(相对于串联型机器人), 使得其每个运动轴之间存在相互耦合关系, 这也直接导致了并联机器人在某些工作区域内存在着奇异位形, 所以并联机器人相对于串联机器人的运动学分析更为复杂。

1.1 几何参数

如图 1 所示, 三自由度冗余驱动并联机器人平台主要由三对连杆组成, 每一对连杆(AA' 和 A'E, BB' 和 B'E, CC' 和 C'E)构成一只手臂, 每一对连杆(手臂)中的第一根连杆为驱动连杆(AA', BB', CC'), 第二根连杆为从动连杆(A'E, B'E, C'E), 三套驱动电机安装在驱动连杆的起始端(A, B, C), 三套驱动电机分布在一个正三角形顶点上(边长为 500 mm), 三根从动连杆末端连接为一个活动关节 E(称为末端 E), 末端 E 上安装有工具(笔架), 连杆长: $L = |AA'| = |A'E| = |BB'| = |B'E| = |CC'| = |C'E| = 244$ mm, 驱动电

收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-08-09。

作者简介: 刘保朝(1979-), 男, 研究生, 讲师, 主要从事机电一体化技术方向的研究。

机间距离: $D = |AB| = |BC| = |CA| = 500 \text{ mm}$ 。

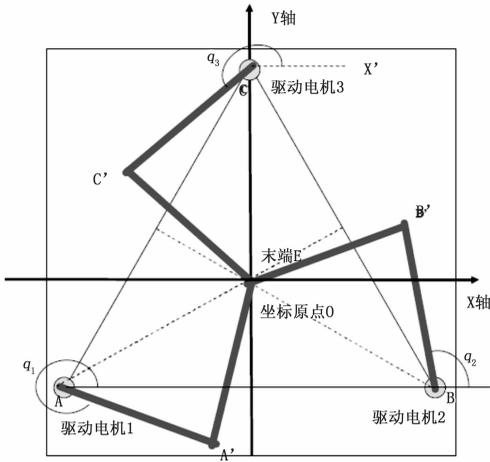


图 1 三自由度冗余驱动并联机器人机构示意图

1.2 坐标系建立

建立如上图 1 所示坐标系: 取与 AB 平行且过 ABC 中心方向为坐标系 X 轴, AB 的中垂线为 Y 轴 (C 点在 Y 轴上, Y 轴经过三角形 $\triangle ABC$ 的重心); 三根驱动连杆 AA' , BB' , CC' 与坐标系 X 轴方向夹角 (驱动电机的转角) 分别记为 q_1 , q_2 , q_3 ; 根据以上坐标系, 驱动电机关节 A , B , C 点的直角坐标位置固定:

$$\begin{cases} A \text{ 点 } (x_A, y_A): x_A = -250, y_A = -144.3376 \\ B \text{ 点 } (x_B, y_B): x_B = 250, y_B = -144.3376 \\ C \text{ 点 } (x_C, y_C): x_C = 0, y_C = D * \sin 60^\circ \approx 288.6751 \end{cases} \quad (1)$$

1.3 运动学正解

已知三个驱动电机的角度 q_1 , q_2 , q_3 , 求解工具末端 E 在直角坐标系中的坐标 (x_E, y_E) 。

1) 驱动连杆末端 A' , B' , C' 在直角坐标系中的坐标:

$$\begin{cases} x_{A'} = x_A + L \cdot \cos q_1 \\ y_{A'} = y_A + L \cdot \sin q_1 \\ x_{B'} = x_B + L \cdot \cos q_2 \\ y_{B'} = y_B + L \cdot \sin q_2 \\ x_{C'} = x_C + L \cdot \cos q_3 \\ y_{C'} = y_C + L \cdot \sin q_3 \end{cases} \quad (2)$$

2) 根据两点间距离公式和 $|A'E| = |B'E| = |C'E| = D$ 得到联立方程 (没有利用连杆长度信息):

$$\begin{cases} (x_{A'} - x_E)^2 + (y_{A'} - y_E)^2 = (x_{B'} - x_E)^2 + (y_{B'} - y_E)^2 \\ (x_{C'} - x_E)^2 + (y_{C'} - y_E)^2 = (x_{B'} - x_E)^2 + (y_{B'} - y_E)^2 \end{cases} \quad (3)$$

3) 令 A' , B' , C' 点到坐标系原点距离的平方记为:

$$\begin{cases} U = x_{A'}^2 + y_{A'}^2 \\ V = x_{B'}^2 + y_{B'}^2 \\ W = x_{C'}^2 + y_{C'}^2 \end{cases} \quad (4)$$

4) 最后求解得到运动学正解方程:

$$\begin{cases} x_E = \frac{1}{2} \cdot \frac{U \cdot (y_{B'} - y_{C'}) + V \cdot (y_{C'} - y_{A'}) + W \cdot (y_{A'} - y_{B'})}{x_{A'} \cdot (y_{B'} - y_{C'}) + x_{B'} \cdot (y_{C'} - y_{A'}) + x_{C'} \cdot (y_{A'} - y_{B'})} \\ y_E = -\frac{1}{2} \cdot \frac{U \cdot (x_{B'} - x_{C'}) + V \cdot (x_{C'} - x_{A'}) + W \cdot (x_{A'} - x_{B'})}{x_{A'} \cdot (y_{B'} - y_{C'}) + x_{B'} \cdot (y_{C'} - y_{A'}) + x_{C'} \cdot (y_{A'} - y_{B'})} \end{cases} \quad (5)$$

1.4 运动学反解

已知工具末端 E 在直角坐标系中的坐标, 求解三个驱动电机的角度 q_1 , q_2 , q_3 , 根据三角关系可以推出 (角度转化到 $[0, 360^\circ]$):

$$\begin{cases} q_1 = 2\pi - (\angle A'AE - \angle OAE) = \text{atan2}(y_E - y_A, x_E - x_A) - \cos^{-1} \frac{|AE|}{2L} \\ q_2 = \angle XBE - \angle B'BE = \text{atan2}(y_E - y_B, x_E - x_B) - \cos^{-1} \frac{|BE|}{2L} \\ q_3 = \angle X'CE - \angle C'CE = 2\pi + \text{atan2}(y_E - y_C, x_E - x_C) - \cos^{-1} \frac{|CE|}{2L} \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} |AE| = \sqrt{(y_E - y_A)^2 + (x_E - x_A)^2} \\ |BE| = \sqrt{(y_E - y_B)^2 + (x_E - x_B)^2} \\ |CE| = \sqrt{(y_E - y_C)^2 + (x_E - x_C)^2} \end{cases} \quad (7)$$

计算得到当并联机器人工具末端处于直角坐标系中 $(0, 0)$ 时通过运动学反解计算^[5]得到此时三个驱动关节角度:

$$q_1 = -23.7331, q_2 = 96.2669, q_3 = 216.2669$$

可以看出三个关节角度间相差均为 120 度, 此时并联机器人三对连杆处于对称分布结构, 我们一般将此时末端所处的位置作为机器人机械零点标定位置, 亦是绝对原点位置。

1.5 工作空间确定

工作空间的确定是并联机器人反向运动学中的一个关键问题, 要确保并联机构连杆末端规划点在有效工作范围, 就必须先确定工作空间 (即反解存在的区域)。

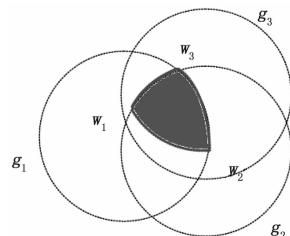


图 2 三自由度冗余驱动并联机器人工作空间图

以主动杆起始端点 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 、 $C(x_C, y_C)$ 三点为圆心, 连杆手臂长为半径画圆, 分别得到圆 g_1 、圆 g_2 、圆 g_3 , 如图 2 所示, 圆 g_1 、圆 g_2 、圆 g_3 可以视为三个轴的独立运动范围。 W_1 是圆 g_2 和圆 g_3 的一个交点; W_2 是圆 g_1 和圆 g_3 的一个交点; W_3 是圆 g_1 和圆 g_2 的一个交点; 弧 W_1W_2 在圆 g_3 上; 弧 W_2W_3 在圆 g_1 上; 弧 W_3W_1 在圆 g_2 上; 所以可以确定弧 W_1W_2 、弧 W_2W_3 、弧 W_3W_1 包括的范围即为三自由度冗余驱动并联机器人有效工作范围 (图 2 中的蓝色区域)。圆 g_1 、圆 g_2 、圆 g_3 表达式如式 (8) 所示, 其中半径 R 长度等于连杆手臂长度, $R = 244 + 244 = 488 \text{ mm}$ 。

$$\begin{cases} g_1: (x - xa1)^2 + (y - ya1)^2 = R^2 \\ g_2: (x - xa2)^2 + (y - ya2)^2 = R^2 \\ g_3: (x - xa3)^2 + (y - ya3)^2 = R^2 \end{cases} \quad (8)$$

1.6 Matlab 运动仿真

Matlab 是一款可视化的具有极为强大矩阵计算能力的软件, 它包含了上百个预先定义好的命令和函数, 这些函数能通过用户自定义函数进一步扩展。Matlab 除了具有强大的矩阵运算能力外, 同时还有着较强的二维、三维绘图能力, 利用 Matlab 进行仿真^[6]能够大大缩短机器人的开发周期。

前面我们已经对三自由度冗余驱动并联机器人的运动学正解和工作空间进行了分析, 接下来将在 Matlab 环境下利用 M 语言建立其仿真模型, 并进行运动仿真实验, 最后分析仿真结果。仿真模型如图 3 所示, 部分仿真代码如下:

```
s = 500; %基座电机间距
a = 244; %主动杆长度
b = 244; %从动杆长度
x0=0; %原点初始 X 坐标
y0=0; %原点初始 Y 坐标
theta= pi * 1/6; %动平台转角
DXc = [Xc(1) Xc(2) Xc(3) Xc(1)];
DYc = [Yc(1) Yc(2) Yc(3) Yc(1)];
plot(DXc,DYc)
hold on
text(sum(Xc)/3-15,sum(Yc)/3-15,[' num2str(theta * 180/pi) '])
plot(sum(Xc)/3,sum(Yc)/3,'pb')
hold on
f1 = 2 * a * (Ya - Yc);
f2 = 2 * a * (Xa - Xc);
f3 = Xc * Xc + Yc * Yc + Xa * Xa + Ya * Ya - 2 * Xc * Xa - 2 * Yc * Ya + a^2 - b^2;
ThetaO = 2 * atan((-f1 + sqrt(f1.^2 + f2.^2 - f3.^2))./(f3
```

-f2));

$$\text{Thata1} = 2 * \text{atan}((-f1 - \text{sqrt}(f1.^2 + f2.^2 - f3.^2))./(f3 - f2)).$$

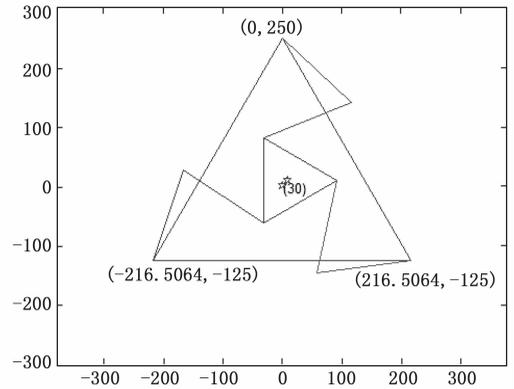


图 3 三自由度冗余驱动并联机器人 Matlab 仿真模型

2 系统控制架构

三自由度冗余驱动并联机器人控制系统主要由机器人本体和电气控制箱两大部分组成^[7], 二者之间通过带屏蔽功能的通讯线缆连接, 机器人本体包括工作台面、连杆手臂、伺服电机及电磁铁笔架。

工作台面主要用于安装三个连杆手臂及其电机, 同时也是机器人的工作空间台面, 机器人末端绘图笔将在工作台面上绘制出末端运动轨迹, 每个连杆手臂都由一根主动杆和一根从动杆组成, 工作台面的一个等边三角形的三个顶点安装有三套交流伺服电机, 用于驱动对应连杆手臂运动。运动控制器、伺服驱动器、开关电源等则安装于电气控制箱内部。系统采用 PC 机+运动控制器的控制方案, 三自由度冗余驱动并联机器人控制框图如图 4 所示。

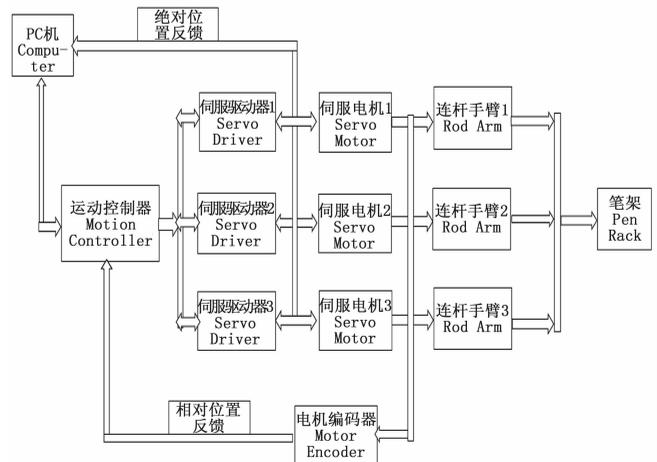


图 4 三自由度冗余驱动并联机器人控制框图

3 控制软件设计

三自由度冗余驱动并联机器人软件是机器人控制系统设计的核心, 是控制代码及控制算法等资源的统称, 机器人软件架构的设计好坏直接关系到机器人系统的成败。三

自由度冗余驱动并联机器人软件具体设计过程应该包括以下三个方面:

- 1) 软件系统架构设计;
- 2) 具体功能模块的程序实现;
- 3) 系统性集成;

三自由度冗余驱动并联机器人的主要功能是绘图,即并联机器人末端绘图笔需要在工作台面上绘制出用户编辑的轨迹,为防止轨迹范围超出并联机器人有效工作区域,编辑好的轨迹需要先进行绘制求解,然后再进行运动仿真,如果不进行运动仿真直接实际控制则有可能损坏机器人,运动仿真通过以后才能开始实际控制并联机器人绘图,运动控制指令及编码器反馈指令均由运动控制器完成,在此过程中涉及的模块包括轨迹编辑、绘制求解、运动仿真、反馈采集、零点标定、运动控制等,每个模块功能如下描述:

- 1) 轨迹编辑: 用户手动绘制轨迹
- 2) 绘制求解: 轨迹的运动学正向求解与反向求解
- 3) 运动仿真: 轨迹的动态模拟仿真
- 4) 反馈采集: 相对式及绝对式编码器数据采集
- 5) 零点标定: 机器人绝对零点位置设定
- 6) 运动控制: 电机控制指令接口

三自由度冗余驱动并联机器人软件系统架构如表 1 所示。

表 1 三自由度冗余驱动并联机器人软件系统架构

应用层(功能模块)		
轨迹编辑	绘制求解	运动仿真
反馈采集	零点标定	运动控制
服务层(应用程序接口 API)		动态链接库 DLL
操作系统层(WINDOWS)		

三自由度冗余驱动并联机器人控制主流程如图 5 所示。运动控制器提供了 Windows 下的动态链接库 DLL,只要调用函数库中的指令,就可以实现运动控制器的各种功能。在 Visual C++ 中调用运动控制器提供的函数库中的运动函数,开始采用 MFC 编写三自由度冗余驱动并联机器人控制软件。

实现并联机器人运动学正解函数核心代码如下:

```
bool ForwardKinematics(double t1,double t2,double t3,double &Cx,double& Cy)
{
//[输入]:t1,t2,t3 驱动关节电机角度,单位为 rad
//[输出]:Cx,Cy 末端位置,单位为 mm
double xa1,ya1,xb1,yb1,xc1,yc1;
double U,V,W;
xa1=XA+ARM_LENGTH*cos(t1);ya1=YA+ARM_LENGTH*sin(t1);
xb1=XB+ARM_LENGTH*cos(t2);yb1=YB+ARM_LENGTH*sin(t2);
```

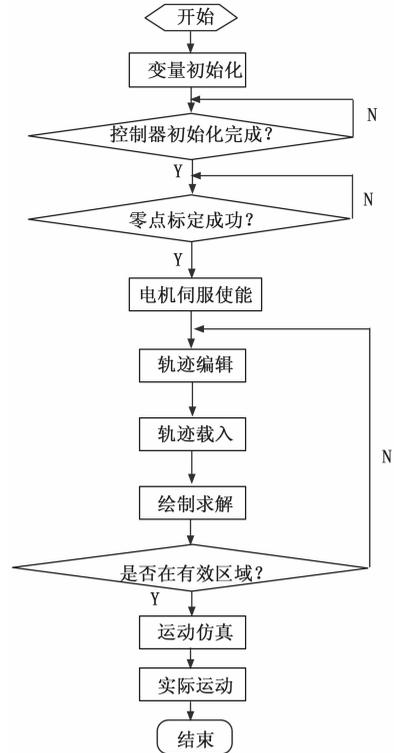


图 5 三自由度冗余驱动并联机器人控制主流程图

```
xc1=XC+ARM_LENGTH*cos(t3);yc1=YC+ARM_LENGTH*sin(t3);
U=xa1*xa1+ya1*ya1;
V=xb1*xb1+yb1*yb1;
W=xc1*xc1+yc1*yc1;
Cx=0.5*(U*(yb1-yc1)+V*(yc1-ya1)+W*(ya1-yb1))/(xa1*(yb1-yc1)+xb1*(yc1-ya1)+xc1*(ya1-yb1));
Cy=-0.5*(U*(xb1-xc1)+V*(xc1-xa1)+W*(xa1-xb1))/(xa1*(yb1-yc1)+xb1*(yc1-ya1)+xc1*(ya1-yb1));
return true;
}
```

实现并联机器人运动学反解函数核心代码如下:

```
bool InverseKinematics(double Cx,double Cy,double &t1, double &t2,double &t3)
{
//[输入]:Cx,Cy 末端位置,单位为 mm
//[输出]:t1,t2,t3 驱动关节电机角度,单位为 rad
//判断输入点是否在工作空间内
if(IsPointInWorkspace(Cx,Cy)==false)
return false;
double DAE,DBE,DCE;
DAE=sqrt((Cy-YA)*(Cy-YA)+(Cx-XA)*(Cx-XA));DBE=sqrt((Cy-YB)*(Cy-YB)+(Cx-XB)*(Cx-XB));DCE=sqrt((Cy-YC)*(Cy-YC)+(Cx-XC)*(Cx-XC));t1=atan2((Cy-YA),(Cx-XA))-acos(DAE/(2.*ARM_LENGTH));t2=atan2((Cy-YB),(Cx-XB))-acos(DBE/(2.*ARM_LENGTH));t3=2*pi+atan2((Cy-YC),(Cx-XC))-
```

```
acos(DCE/(2.* ARM_LENGTH));
```

```
return true;
}
```

根据控制主流程图编写完成后的控制软件运行结果如图 6 所示。

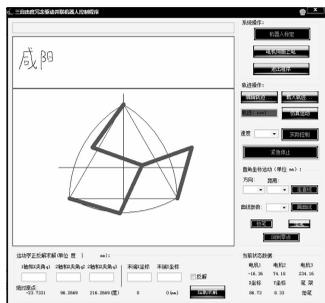


图 6 三自由度冗余驱动并联机器人控制软件界面

4 控制效果及分析

控制软件设计完成以后, 就可以在轨迹编辑中开始编辑轨迹。轨迹的鼠标输入方法: 移动鼠标到绘图区, 光标会变成绘图笔形状, 此时可以按下鼠标左键开始在绘图区绘图, 松开鼠标左键结束当前绘图笔画, 按下鼠标左键开始下一个绘图笔画。编辑好的绘图轨迹可以通过轨迹编辑器界面中的“打开文件”按钮打开, 然后进行轨迹求解, 若求解出的目标点不在并联机器人有效工作区域, 则会弹出警告提示框, 如图 7 所示。

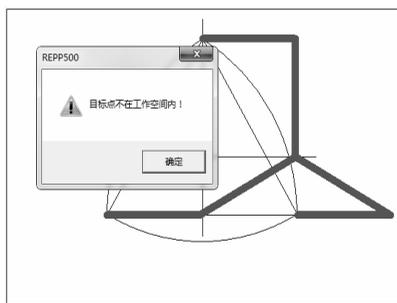


图 7 目标点不在工作空间内

求解完成以后通过“仿真运动”模拟运行绘图轨迹文件, 仿真试验满意的轨迹可以执行实际控制, 选择速度档中的“低速”、“中速”、“高速”, 点击“实际控制”将在工作台上(铺上纸张)绘制出并联机器人末端运动轨迹。

实际运行中的三自由度冗余驱动并联机器人如图 8 所示。



图 8 运行中的三自由度冗余驱动并联机器人

三自由度冗余驱动并联机器人运动过程中, 由运动学函数理论计算得到的三个主动关节转动角度(红色曲线表示)和编码器实际测量得到的三个主动关节转动角度(蓝色曲线表示)之间的误差曲线如图 9 所示。

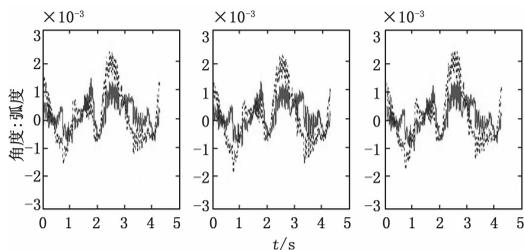


图 9 三自由度冗余驱动并联机器人运动误差曲线图

误差曲线图表明三自由度冗余驱动并联机器人在实际运动过程中虽然存在一定的误差, 但最大误差也只有 0.001 弧度, 此误差很小, 系统中基本可以忽略, 实际绘制轨迹基本能和仿真轨迹一致, 说明了此控制系统具有较高的控制精度。

5 结语

本文提出一种对称结构的三自由度冗余驱动并联机器人机构, 采用冗余驱动和结构对称使得该并联机器人具有更为优良的机构性能, 首先详细阐述了该并联机器人的运动学基础知识, 包括几何参数、坐标系建立、运动学正反解等, 并利用 MATLAB 工具进行了机器人运动仿真, 缩短了开发周期, 并以控制框图的形式展现了系统的整个控制架构, 最后采用 MFC 编程实现了机器人人机交互, 实现了较好的控制效果。

并联机器人作为一种全新的机器人, 它具有刚度大、承载能力强、误差小、精度高、动力性能好等一系列优点, 其运用涉及到诸多方面, 但并联机器人尤其是多自由度并联机器人的理论和其相应的控制技术还不成熟, 所以对此作出研究是必要而且大有意义的。

参考文献:

- [1] 冯李航, 张为公, 龚宗洋. Delta 系列并联机器人研究进展与现状 [J]. 机器人, 2014, 36 (3): 375-384.
- [2] 马 瑶, 宋胜涛, 李瑞琴, 等. 三自由度刚柔耦合并联机器人位置解和工作空间研究 [J]. 机械传动, 2017, 41 (12): 14-18.
- [3] 尹光才, 訾 斌, 陈 桥, 等. 混合驱动腰部康复机器人机构设计及运动学分析 [J]. 机械传动, 2016, 40 (4): 68-73.
- [4] 陈修龙, 蒋德玉, 陈林林, 等. 冗余并联机构运动学性能分析与优化 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (6): 340-347.
- [5] 郭宗和, 杜晴晴, 杨启志. 新型 3-PRRS 并联机构位置正反解分析 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (4): 451-455.
- [6] 吴 昊. 基于虚拟现实的并联机器人仿真系统开发 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [7] 龚中强. 一种高速拾取并联机器人控制系统的开发与应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.