

关节机器人制孔过程仿真系统开发

Simulation System Development of Drilling Process of Joint Robot

南京航空航天大学 王日平 张得礼 陈文亮

[摘要] 针对不同类型制孔机器人的仿真,提出了一种机器人可重配置的建模方法。该方法根据机器人的不同类型,建立虚拟的部件及运动关系树结构,对机器人的结构进行不同的配置。采用面向对象技术,在Windows操作平台上选用Visual C++6.0结合SGI公司提供的OpenGL库进行开发。针对一款携带制孔末端执行器的关节机器人,在仿真系统上进行机器人配置,结合关节机器人运动学方程及轨迹规划实现机器人模型在软件界面中的动态显示。

关键词: 机器人 仿真 运动学分析 配置

[ABSTRACT] To solve the problem of software development in the simulation for different types of drilling robots, a reconfigurable modeling approach for robots is put forward in this article. This method configures the structure of the robot and establishes virtual components and tree structure of movement relations according to the type of robot. The simulation system of the drilling robot for aircrafts is developed by using of object oriented technology and Visual C++6.0 combined with OpenGL library provided by the SGI company based on Windows operation system platform. The robot configuration through simulation system is done in this article concerning a joint robot with drilling end effector. The simulation system can accomplish dynamic display of the robot model by virtue of robots motion equations and trajectory planning.

Keywords: Robot Simulation Kinematics analysis Configuration

随着数字化技术和机器人技术的发展,机器人已演变成一种智能化的设备,出现了具有自主性、移动性、作业性特点的智能机器人。智能机器人技术已能满足飞机装配的需求,作为一种灵巧、高柔性的自动化装备,集成应用于飞机自动化柔性装配系统中,能适应多种复杂装配环节的工作,可以更加快速、准确地移动、定位、调整和作业^[1]。而机器人作业一般具有危险性、现场环境恶劣、作业流程复杂、对工作人员的要求比较高,开发开放通用的机器人仿真系统可以为机器人的开发研制、培训和操作、维护和二次开发带来极大的方便。特别是对

6自由度或更高自由度的关节机器人,由于其运动学方程逆解没有直观的封闭解析形式,系统可以对高自由度机器人的运动学控制进行仿真,为相关理论研究提供算法和思路的验证。通过仿真,使用虚拟现实的友好的作业仿真系统,不需要对机器人作业过程进行实际操作,无疑会节省大量试验、培训费用,免除很多不必要的麻烦和危险^[2]。

本文研究和开发的关节机器人制孔过程仿真系统采用面向对象技术,对一些功能模块进行开发和应用,主要包括机器人运动关系模块、文件导入导出模块、模型显示模块、指令接口模块、机器人算法模块。提出一种机器人可重配置的建模方法,根据机器人的几何结构建立运动关系树状图,实现机器人仿真系统快速准确地建立机器人三维模型,并针对一款携带制孔末端执行器的关节机器人在仿真系统上进行运动学验证。

1 机器人仿真系统框架分析

仿真软件采用面向对象技术,在Windows操作平台上选用Visual C++6.0结合SGI公司提供的OpenGL库进行开发,模块化设计思想贯穿整个仿真软件的设计开发过程中。仿真软件主要由5个功能模块组成,包括机器人运动关系模块、文件导入导出模块、模型显示模块、指令接口模块和机器人算法模块,仿真系统总体框架结构如图1所示。

(1) 机器人运动关系模块实现了机器人模型各虚拟构件之间运动关系的定义,并定义关节变量来描述构件之间的相对位置关系,而且提供运动关系定义是否正确的方法。

(2) 文件导入导出模块实现了仿真软件读取输入的STL格式的几何模型,并通过串行化的方法将输入模型保存为自己的文档。

(3) 模型显示模块实现了机器人模型在软件界面中静态和动态的显示以及对显示模型的操作,如视图变换、旋转缩放、颜色设置等。

(4) 指令接口模块实现了仿真系统通过读取编写的运动指令文件来仿真关节型制孔机器人的运动过程。

(5) 机器人算法模块是运动学仿真的核心,仿真系统对关节机器人运动学算法进行了封装,该功能模块为

机器人运动学仿真的实现提供了可能。

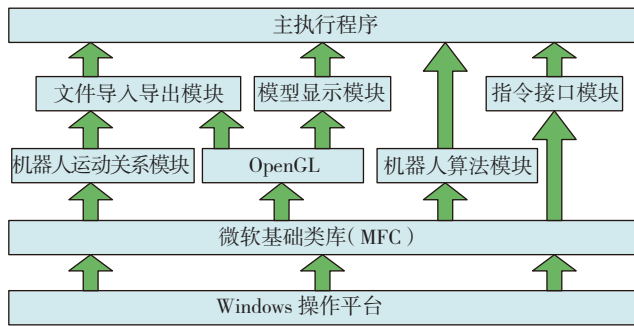


图1 仿真系统总体框架结构图
Fig.1 Overall frame structure of simulation system

2 关节机器人孔姿求解

2.1 运动分析与坐标系建立

本文研究的关节机器人是机械臂在末端通过法兰盘刚性连接一个制孔末端执行器,属于6自由度关节机器人,并且6个关节都是转动连接。关节机器人的关节1~3用于确定末端执行器的位置,关节4~6用于确定末端执行器的姿态。关节4~6的轴线相交于一点,原因是这样的机器人结构其逆运动学存在解析解。关节1的轴线为竖直方向;关节2和关节3的轴线为水平方向,且相互平行。关节1和关节2的轴线垂直但不相交,关节3和关节4的轴线也是垂直不相交。根据上述分析建立连杆坐标系(图2)。坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 为基坐标系,原点 O_0 位于轴1和轴2公法线与轴1的交点上, X_0 方向沿公法线从轴1指向轴2, Z_0 方向沿竖直方向;坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 与坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 重合;坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 的原点 O_2 位于轴2和轴3公法线与轴2的交点上, X_2 方向沿公法线从轴2指向轴3, Z_2 方向沿轴2方

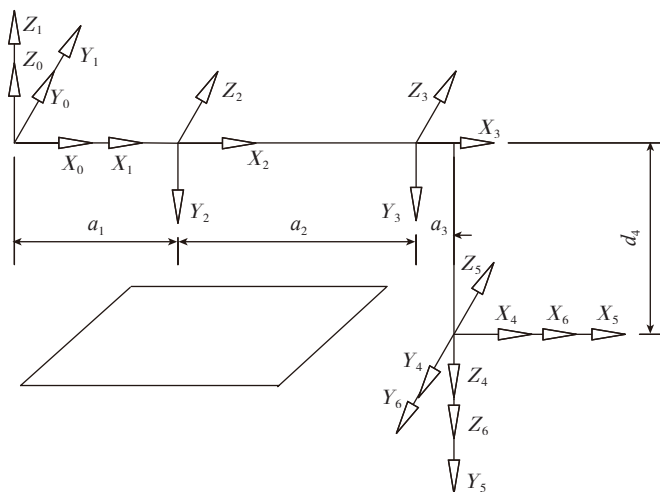


图2 关节机器人坐标系示意图
Fig.2 Schematic diagram of coordinate system of joint robot

向;坐标系 $O_3-X_3Y_3Z_3$ 的原点 O_3 位于轴3和轴4公法线与轴3的交点上, X_3 沿公法线从轴3指向轴4, Z_3 沿轴3方向;坐标系 $O_4-X_4Y_4Z_4$ 、 $O_5-X_5Y_5Z_5$ 、 $O_6-X_6Y_6Z_6$ 的原点位于轴4、轴5、轴6的交点处, X_4 沿轴4和轴5公法线方向, Z_4 沿轴4方向, X_5 沿轴5和轴6公法线方向, Z_5 沿轴5方向, X_6 沿末端执行器刀具方向, Z_6 沿轴6方向。

2.2 孔姿求解

对关节机器人制孔运动过程的仿真需要求解在预制孔位置和姿态下的机器人6关节角度值,而预制孔孔位信息可通过飞机机身蒙皮 MBD 模型提取,飞机机身蒙皮 MBD 模型和局部孔位模型如图3、图4所示,所获取的孔位信息如图5所示,这里孔位信息包括预制孔在基坐标系0的位置坐标 (X_{OP}, Y_{OP}, Z_{OP}) ,预制孔法向在基坐标系0的3个轴的分量为 (X_N, Y_N, Z_N) 。

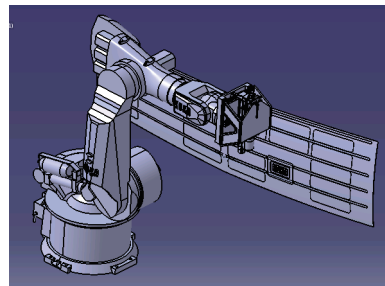


图3 整体MBD模型
Fig.3 Entire MBD model

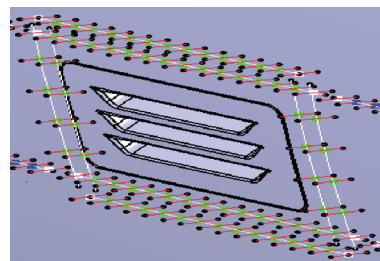


图4 飞机机身蒙皮局部孔位模型
Fig.4 Local model of hole position on fuselage skin

序号	x	y	z	法向x	法向y	法向z
684	2279.52	7912.05	26.7962	0.89955	-0.16997	0.402381
685	1651.39	6114.66	353.008	-0.815729	0.25989	-0.516763
686	1662.05	6114.65	336.051	0.819047	-0.260506	0.511174
687	1727.06	6114.64	226.806	-0.839854	0.264152	-0.475794
688	1736.89	6114.64	209.352	-0.841924	0.264682	-0.470221
689	1796.57	6114.63	97.1017	-0.859866	0.267744	-0.434677
690	1805.54	6114.63	79.1993	-0.862551	0.268177	-0.429053
691	1859.82	6114.63	-35.7...	0.878705	-0.270605	0.393256
692	1867.95	6114.63	-54.0...	-0.881115	0.270936	-0.387595
693	1900.07	7793.49	603.574	0.585038	-0.0482...	-0.809569

图5 飞机机身蒙皮孔位信息
Fig.5 Position information of holes on fuselage skin

机器人制孔时刀具方向与预制孔法向相反,即坐标系6的 X 轴方向与预制孔法向相反,设坐标系6相对于坐标系0的坐标变换矩阵为 $\begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$,可直接

计算得到:

$$m_{00} = -\frac{X_N}{\sqrt{X_N^2 + Y_N^2 + Z_N^2}},$$

$$m_{10} = -\frac{Y_N}{\sqrt{X_N^2 + Y_N^2 + Z_N^2}},$$

$$m_{20} = -\frac{Z_N}{\sqrt{X_N^2 + Y_N^2 + Z_N^2}},$$

又坐标系 6 相对于坐标系 0 的坐标变换矩阵可以表示为绕 3 个坐标轴先后转动 3 个角度 ($\alpha_A, \beta_A, \gamma_A$), 即先绕 Z 轴转 α_A , 再绕 Y 轴转 β_A , 最后绕 X 轴转 γ_A , 坐标变换矩阵又可写为:

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_A \cos \beta_A & \cos \alpha_A \sin \beta_A \sin \gamma_A - \sin \alpha_A \cos \gamma_A \\ \sin \alpha_A \cos \beta_A & \sin \alpha_A \sin \beta_A \sin \gamma_A + \cos \alpha_A \cos \gamma_A \\ -\sin \beta_A & \cos \beta_A \sin \gamma_A \end{pmatrix}$$

可得:

$$\begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_A \cos \beta_A & \cos \alpha_A \sin \beta_A \sin \gamma_A - \sin \alpha_A \cos \gamma_A \\ \sin \alpha_A \cos \beta_A & \sin \alpha_A \sin \beta_A \sin \gamma_A + \cos \alpha_A \cos \gamma_A \\ -\sin \beta_A & \cos \beta_A \sin \gamma_A \end{pmatrix}$$

出: $m_{00} = \cos \alpha_A \cos \beta_A, m_{10} = \sin \alpha_A \cos \beta_A, m_{20} = -\sin \beta_A$, 解得: $\sin \beta_A = -m_{20}, \cos \beta_A = -\sqrt{1 - m_{20}^2}, \sin \alpha_A = m_{10} / \cos \beta_A, \cos \alpha_A = m_{00} / \cos \beta_A, \gamma_A$ 的取值可以为任意值, 保证刀具方向与预制孔法向相反。

设坐标系 6 相对于坐标系 0 的坐标变换矩阵为:

$${}^0T_6 = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}, \text{ 将 } \sin \alpha_A, \sin \beta_A,$$

$\sin \gamma_A, \cos \alpha_A, \cos \beta_A, \cos \gamma_A$ 的值代入可得:

$$m_{00} = \cos \alpha_A \cos \beta_A,$$

$$m_{01} = \cos \alpha_A \sin \beta_A \sin \gamma_A - \sin \alpha_A \cos \gamma_A,$$

$$m_{02} = \cos \alpha_A \sin \beta_A \cos \gamma_A + \sin \alpha_A \sin \gamma_A,$$

$$m_{10} = \sin \alpha_A \cos \beta_A,$$

$$m_{11} = \sin \alpha_A \sin \beta_A \sin \gamma_A + \cos \alpha_A \cos \gamma_A,$$

$$m_{12} = \sin \alpha_A \sin \beta_A \cos \gamma_A - \cos \alpha_A \sin \gamma_A,$$

$$m_{20} = -\sin \beta_A,$$

$$m_{21} = \cos \beta_A \sin \gamma_A,$$

$$m_{22} = \cos \beta_A \cos \gamma_A.$$

又设预制孔在坐标系 6 下的坐标为 (X_{6P}, Y_{6P}, Z_{6P}), 且末端执行器在 6 坐标系下的补偿值为 (X_0, Y_0, Z_0). 且满足:

$$X_{6P} = X_0,$$

$$Y_{6P} = Y_0,$$

$$Z_{6P} = Z_0 + L_5 + L_6,$$

其中, L_5 和 L_6 分别为第 5 和第 6 根杆件长度。

$$\text{由于 } \begin{pmatrix} X_{0P} \\ Y_{0P} \\ Z_{0P} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{6P} \\ Y_{6P} \\ Z_{6P} \\ 1 \end{pmatrix},$$

可得:

$$m_{03} = X_{0P} - m_{00} \cdot X_{6P} - m_{01} \cdot Y_{6P} - m_{02} \cdot Z_{6P},$$

$$m_{13} = Y_{0P} - m_{10} \cdot X_{6P} - m_{11} \cdot Y_{6P} - m_{12} \cdot Z_{6P},$$

$$m_{23} = Z_{0P} - m_{20} \cdot X_{6P} - m_{21} \cdot Y_{6P} - m_{22} \cdot Z_{6P}.$$

又

$${}^0T_6 = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix},$$

式中, ${}^i T_{i+1}$ 为坐标系 $i+1$ 相对于坐标系 i 的坐标变换矩阵 ($i=0, 1, 2, 3, 4, 5$), 而且整个坐标变换矩阵已知, 将方程两端依次左乘逆变换 (0T_1)⁻¹, (1T_2)⁻¹, (2T_3)⁻¹, (3T_4)⁻¹, (4T_5)⁻¹ 得到不同的等式, 从而得到 6 个关节角度的值^[3]。

在实际应用中, 根据机器人的实际可达空间以及机器人当前的运动情况, 确定所需要的逆向运动学的解。

3 关节机器人运动关系建模

在虚拟环境下, 机器人三维模型与周边环境的建立必须保证与真实机器人在几何尺寸、约束关系、周边环境等方面保持一致。本研究选择 STL 格式文件作为仿真系统一个标准的三维几何模型文件接口, 机器人各部件都可以在一些常用的软件中 (如 CATIA、Pro/E、UG 等) 建模, 然后将其保存为 STL 格式文件供仿真系统读取, 并装配为虚拟机器人^[4]。

图 6 为携带制孔末端执行器的关节机器人, 各个虚拟部件及它们的运动关系树结构如图 7 所示。腰关节相对于基座绕 Z 轴转动, 臂关节相对于腰关节绕 X 轴转动, 肘关节相对于臂关节绕 X 轴转动, 旋转腕关节相对于肘关节绕 Y 轴转动, 俯仰腕关节相对于旋转腕关节绕 X 轴转动, 末端执行器相对于俯仰腕关节绕 Y 轴转动, 刀具相对于末端执行器沿 Z 轴方向移动。所谓机器人可重配置的建模方法是根据机器人的不同结构, 建立运动关系树状图, 实现机器人仿真系统快速准确的建立机器人三维模型。

仿真系统中, 机器人各个虚拟部件都是通过读取

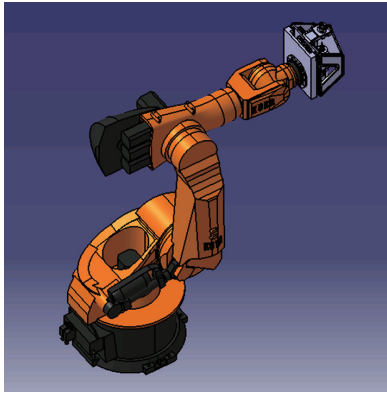


图6 关节机器人CATIA模型
Fig.6 CATIA model of joint robot

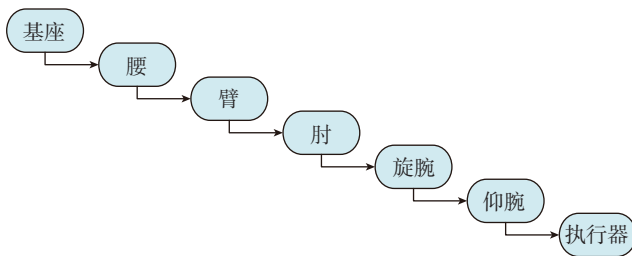


图7 关节机器人树型结构
Fig.7 Tree structure of joint robot

STL 文件得到的,每一个虚拟部件都是类 C STLModel 的一个对象,该类用于描述虚拟部件的几何形状、虚拟部件在机器人中的层次关系、虚拟部件的约束类型及位置关系。类 C STLModel 的定义如下:

```

class AFX_EXT_CLASS C STLModel: public C Entity
{
public:
    C TypedPtrArray<C ObArray, C TriChip*> m_
    TriList;
    // 三角形面片数据链,表示虚拟部件
    int m_part_select[2];
    // 部件编号,表示该部件在树结构中的位置
    int m_father_select[2];
    // 父部件编号,表示该部件的运动继承关系
    int m_pair_select;
    // 部件运动副,有固定、转动、移动 3 种
    C Vector3D m_move_direct;
    // 若为移动副,部件移动方向
    C Vector3D m_rotate_direct;
    // 若为转动副,部件转动方向
    C Vector3D m_rotate_position;
    // 若为转动副,部件转动轴位置偏移量
    double m_move_variable;
    // 部件在移动方向上的移动变量,不同的值表示该
    
```

部件相对于父部件的不同位置

```

        double m_rotate_variable;
        // 部件在转动方向上的转动变量,不同的值表示该
        部件相对于父部件的不同位置
    public:
        void Draw(C OpenGLDC* pDC);
        // 虚拟部件图形绘制函数
        bool LoadSTLFile(LPCTSTR file);
        // STL 文件接口,读入 STL 文件
        ....
    };
    
```

综上所述,在 Visual C++ 开发平台上,结合 OpenGL 技术,建立机器人三维可视化模型,如图 8 所示。

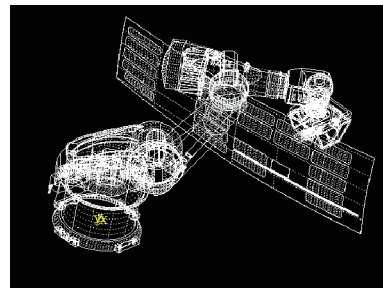


图8 仿真系统中关节机器人模型
Fig.8 Joint robot model in simulation system

4 关节机器人仿真实现

在仿真环境中,系统集成开发了关节机器人运动学正解、逆解算法库,针对关节机器人对飞机中机身穿孔过程轨迹进行规划和仿真,仿真系统设计了手动控制和自动控制两种运动控制方法。

4.1 手动控制

在手动控制模式中,用户可以通过指定 6 关节角度值或者给出末端执行器位置和姿态使机器人移动到期望的位置和姿态,一般通过手动控制将机器人移动到初始位置和初始姿态,手动控制面板如图 9 所示, Model 中 angle 表示通过角度驱动, position 表示通过位置和姿态驱动。

4.2 自动控制

整个机器人运动过程可分为 3 步。(1)姿态初始化,保证末端执行器姿态为(0, 180, 0),即 X 轴方向;(2)运动到待加工位置,运动过程中末端执行器姿态始终为(0, 180, 0);(3)姿态调整,根据待加工孔法向调整末端执行器姿态。重复以上步骤,完成多孔位加工过程的轨迹规划和仿真。

在自动控制模式中,自动控制面板如图 10 所示,用户可以通过编辑文件(由指令组成)或通过给定指令控

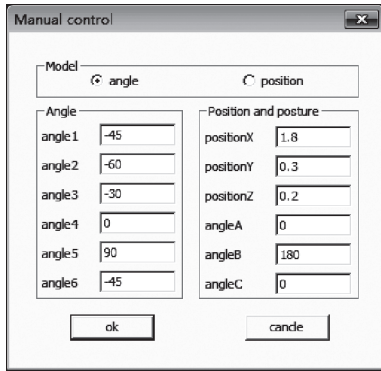


图9 手动控制面板

Fig.9 Interface of manual control

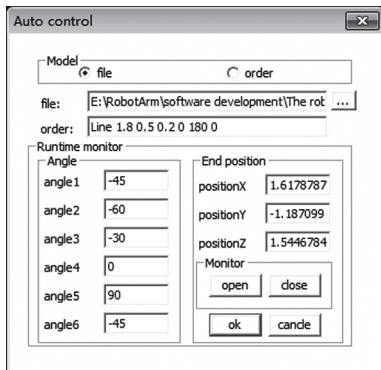


图10 自动控制面板

Fig.10 Interface of automatic control

制机器人按照指定轨迹运动,并且仿真系统提供实时监测模块,监测每一时刻6关节角度值和末端执行器位置。

每一条指令都是重复上述3步,指令格式如下:

Line 1.6 0.5 0.2 10 180 0

//表示机器人以直线方式运动到位置(1.6,0.5,0.2),姿态为(10,180,0)。

Circle 1.6 0.5 0.2 -10 180 0

//表示机器人以圆弧方式运动到位置(1.6,0.5,0.2),姿态为(-10,180,0)。

按照孔位信息规划轨迹,编写上述指令文件,仿真验证轨迹的正确性,仿真结果如图11~13所示。

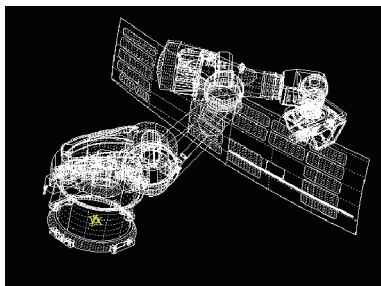


图11 姿态初始化(指向X轴方向)

Fig.11 Initialization of posture (pointing to X direction)

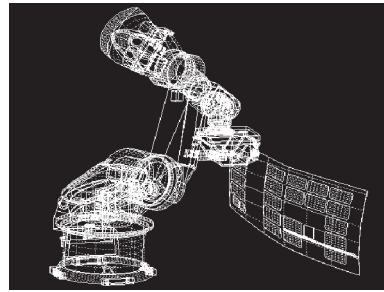


图12 运动到待加工孔位(始终指向X轴方向)

Fig.12 Moving to the position of holes to be processed (always pointing to X direction)

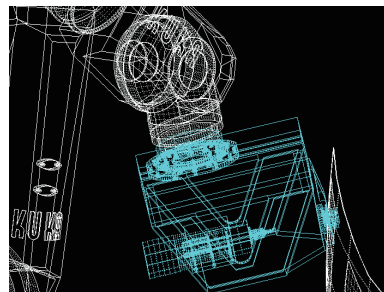


图13 姿态调整(指向孔位法向)

Fig.13 Adjustment of posture (pointing to normal direction of the hole)

针对不同类型的机器人,其算法库的开发完全不同,在该仿真系统中仅集成了关节机器人算法库,对其他类型机器人在该平台下的仿真,系统提供二次开发接口,可以对其他类型机器人算法进行封装。另外,本仿真系统提供与运动控制器的通信接口,直接从运动控制器里读取关节变量的值进行机器人在线仿真。

5 结束语

机器人仿真系统研究和开发就是建立一个虚拟环境,按照真实机器人和周边环境建立模型,在计算机屏幕上实现机器人轨迹的规划和监测,避免机器人在实际作业过程中发生碰撞、干涉等危险,造成不可挽回的损失。另外,该系统的仿真流程容易操作和掌握,使得机器人仿真技术更加方便地应用到实际生产中,对今后的实际生产工作提供可靠的保障。

参考文献

- [1] 蒋新松. 机器人导学. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994: 87-93.
- [2] 秦瑞祥, 邹冀华. 工业机器人在飞机数字化装配中的应用. 航空制造技术, 2010(23): 104-105.
- [3] 蔡自兴. 机器人学. 北京: 清华大学出版社, 2009: 47-53.
- [4] 朱虎, 杨忠凤, 张伟. STL文件的应用与研究发展. 机床与液压, 2009, 6(6): 186-188.

(责编 深蓝)