

YWZ 灵巧手运动学分析和交互式仿真

秦 聪^a, 杨文珍^b, 章 华^b, 邵明朝^b

(浙江理工大学, a. 信息学院, b. 机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 对一种多自由度的灵巧机械手进行了运动学分析以及交互式的运动学仿真。首先介绍了 YWZ 灵巧机械手的机械结构和自由度, 然后通过 D-H 方法得出 YWZ 灵巧机械手的运动学方程, 最后提出一种交互式的运动学仿真方法对 YWZ 灵巧机械手进行运动学仿真。仿真结果表明: 交互式的灵巧机械手运动学仿真能在仿真过程中实时调整虚拟灵巧手各个关节的旋转方向、角度, 优化抓取动作, 不必反复设置运动学参数, 提高了运动学仿真的效率, 有利于灵巧手机械结构的设计和控制方案的改进, 为灵巧手的研制和实际控制提供理论依据。

关键词: 灵巧机械手; 运动学分析; 运动学仿真; 交互式

中图分类号: TP241.2

文献标识码: A

0 引 言

运动学仿真是机械设计过程中不可或缺的一环。通过添加运动、约束和作用力等对机构进行运动学仿真模拟, 不仅能在虚拟环境中观察到机构的运动方式, 而且还能用动画、图形和数据等多种形式输出工作部件的轨迹、速度和加速度等运动学参数, 使机构满足设计要求。灵巧机械手是为多任务而研发的一种智能型通用机械手, 外形类似于人手, 既能进行各种常见操作, 又能稳定抓持形状各异的物体^[1-2]。通过对灵巧机械手进行运动学仿真, 求得灵巧机械手手指各关节的运动参数、活动范围和运动轨迹, 可以分析出灵巧机械手的运动学、动力学和工作空间等性能, 进而为灵巧机械手的设计提供依据。

常规的灵巧机械手运动学仿真方法有: 将机械三维软件中创建的灵巧手模型导入 Adams 仿真软件中, 对其施加相应的约束和作用力使其完成规定的动作, 仿真灵巧手的手指末端运动轨迹曲线、速度曲线、加速度曲线, 仿真灵巧手各关节的运动学性能^[3]; 应用 D-H 方法建立运动学分析模型, 数值求

解灵巧手的运动学性能; 采用蒙特卡洛方法求解灵巧手指末端的位置向量集合, 在 Matlab 环境下用点云图描绘出灵巧手的工作空间^[4]; 应用 CATIA 中的数字模型运动分析模块装配灵巧手并为灵巧手各关节建立驱动命令和运动参数^[5]。

然而, 上述灵巧机械手运动学仿真方法在不进行复杂的二次开发的情况下, 都需要提前设置好灵巧手各关节的运动参数, 且在仿真过程中运动参数不可修改, 使得仿真过程不可逆、不可控。本文提出一种交互式的灵巧机械手运动学仿真方法, 能够在仿真过程中实时调整虚拟灵巧手各个关节的旋转方向、角度, 优化抓取动作, 不必反复设置运动学参数, 提高运动学仿真的效率。

1 YWZ 灵巧手机械结构设计

YWZ 灵巧手由五根手指和一个独立的手掌构成, 除大拇指外的四根手指采用模块化结构设计, 大拇指与其他四指相对垂直放置在手掌内, 其安装位置可调。手指的所有关节为主动关节, 共有 20 个全驱动独立自由度^[6], 如图 1 所示。

收稿日期: 2012-05-03

基金项目: 浙江省杰出青年团队资助项目(R107725); 浙江省科技计划项目(2009C31021); 国家自然科学基金资助项目(60673197); 浙江省科技创新团队资助项目(2010R50005)

作者简介: 秦聪(1987-), 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 研究方向为计算机图形学与辅助设计。

通讯作者: 杨文珍, 电子邮箱: ywz@zstu.edu.cn

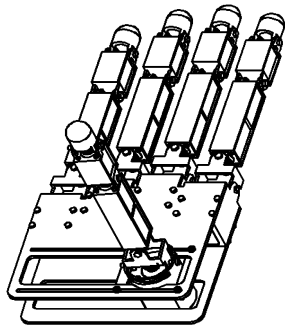


图1 YWZ灵巧手整体结构

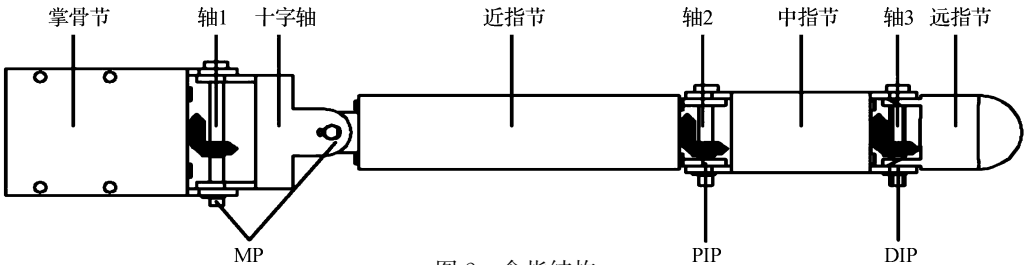


图2 食指结构

1.2 大拇指结构设计

大拇指与食指结构的区别主要是掌骨结构不同,大拇指安装于手掌的滑槽中,可沿滑槽移动,而且可沿掌骨节的弧槽旋转来调节大拇指的朝向,如图3所示。与其它灵巧手的大拇指相比而言,大拇指的朝向和安装位置可调,不但提高了机械手的灵巧性和抓取稳定性,而且增大了灵巧手的抓取空间。

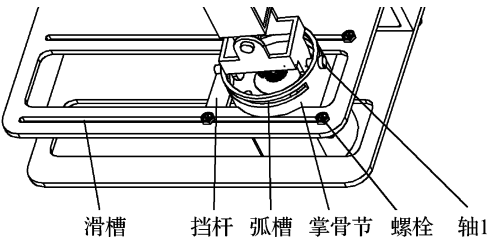


图3 大拇指结构

2 手指运动学方程

2.1 除大拇指外其余四指的运动学方程

单个手指是由多个关节组成的串联机械结构,采用D-H法建立手指坐标系^[7],如图4所示。

图4中 $x_0y_0z_0$ 为基础坐标系, $a_1、a_2、a_3、a_4$ 表示各指节长度, $\theta_1、\theta_2、\theta_3、\theta_4$ 表示各关节转角。 α_i 表示 z_{i-1} 到 z_i 的转角,绕 x_i 轴正向转动为正, d_i 表示 x_{i-1} 到 x_i 的距离,沿 z_{i-1} 轴指向为正。建立表1所示的单指D-H参数。

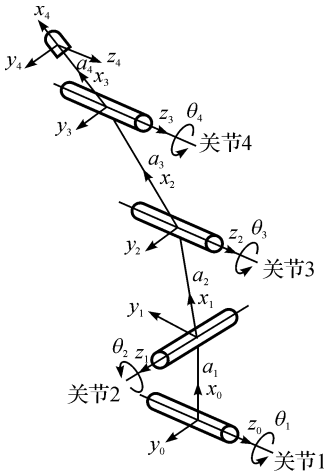


图4 除大拇指外其余四指的单指坐标系

表1 单指D-H参数

关节	$\theta_i/(^\circ)$	$\alpha_i/(^\circ)$	a_i/mm	d_i/mm
1	θ_1	-90	a_1	0
2	θ_2	90	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	0
4	θ_4	0	a_4	0

设手指末端坐标为 (x,y,z) ,带入表1中的D-H参数,通过各个关节变换矩阵的乘积可得到手指末端变换矩阵:

$${}^0_4A = {}^0_1A {}^1_2A {}^2_3A {}^3_4A =$$

$$\begin{bmatrix} c_1c_2c_{34} - s_1s_{34} & -c_1c_2s_{34} - s_1c_{34} & c_1s_2 & a_4(c_1c_2c_{34} - s_1s_{34}) + a_3(c_1c_2c_3 - s_1s_3) + a_2c_1c_2 + a_1c_1 \\ s_1c_2c_{34} + c_1s_{34} & -s_1c_2s_{34} + c_1c_{34} & s_1s_2 & a_4(s_1c_2c_{34} + c_1s_{34}) + a_3(s_1c_2c_3 + c_1s_3) + a_2s_1c_2 + a_1s_1 \\ -s_2c_{34} & s_2s_{34} & c_2 & -a_4s_2c_{34} - a_3s_2c_3 - a_2s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $c_i = \cos\theta_i, s_i = \sin\theta_i, c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j), s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), i, j = 1, 2, 3, 4$ 。

由上式可求得除大拇指外手指末端位置坐标:

$x =$

$$a_4 (c_1 c_2 c_{34} - s_1 s_{34}) + a_3 (c_1 c_2 c_3 - s_1 s_3) + a_2 c_1 c_2 + a_1 c_1$$

$y =$

$$a_4 (s_1 c_2 c_{34} + c_1 s_{34}) + a_3 (s_1 c_2 c_3 + c_1 s_3) + a_2 s_1 c_2 + a_1 s_1$$

$$z = -a_4 s_2 c_{34} - a_3 s_2 c_3 - a_2 s_2 \quad (2)$$

因此,手指末端位置可由关节角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 和指节长度唯一确定。

2.2 大拇指的运动学方程

同理,采用 D-H 法建立大拇指的坐标系,如图 5 所示。

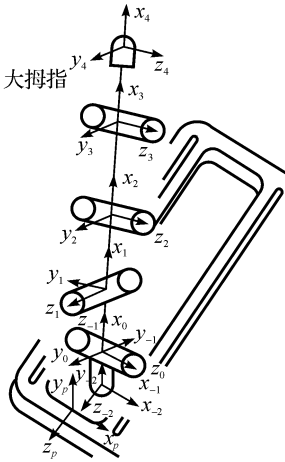


图 5 大拇指坐标系

大拇指指尖坐标系至手掌基坐标的转换矩阵为:

$${}^0 P_4 A = A_{-2} A_{-1} A_0 = \begin{bmatrix} -s_{-1} & 0 & c_{-1} & a_{-1} c_{-1} \\ c_{-1} & 0 & s_{-1} & a_{-1} s_{-1} \\ 0 & 1 & 0 & d_{-2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

大拇指指尖在基坐标系中的位置用各关节相位可以表示为:

$${}^P_4 A = {}^P_0 A_4 A \quad (4)$$

由上式可以推出大拇指指尖位置坐标为:

$$\begin{aligned} x &= -s_{-1} (a_4 (c_1 c_2 c_{34} - s_1 s_{34}) + \\ & a_3 (c_1 c_2 c_3 - s_1 s_3) + a_2 c_1 c_2 + a_1 c_1) - \\ & c_{-1} (a_4 s_2 c_{34} + a_3 s_2 c_3 + a_2 s_2) + a_{-1} c_{-1} \\ y &= c_{-1} (a_4 (c_1 c_2 c_{34} - s_1 s_{34}) + \\ & a_3 (c_1 c_2 c_3 - s_1 s_3) + a_2 c_1 c_2 + a_1 c_1) - \\ & s_{-1} (a_4 s_2 c_{34} + a_3 s_2 c_3 + a_2 s_2) + a_{-1} s_{-1} \\ z &= a_4 (s_1 c_2 c_{34} + c_1 s_{34}) + \\ & a_3 (s_1 c_2 c_3 + c_1 s_3) + a_2 s_1 c_2 + a_1 s_1 + d_{-2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $s_i = \sin\theta_i, c_i = \cos\theta_i, c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j), s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), i, j = -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$ 。

由以上方程可知手指末端的坐标位置取决于手指各关节的旋转角和指节长度,通过预先设定的手指各关节的旋转角和指节长度,可以求出手指末端的坐标位置。然而,预先设定参数的运动学仿真方法,使得仿真过程不可逆、不可控。

3 交互式运动学仿真

为实现灵巧手运动学仿真过程中,实时调整手指各关节的旋转角度和方向,控制手指末端的姿势,本文基于 Virtools 软件,开展 YWZ 灵巧机械手的交互式运动仿真,分析 YWZ 灵巧手关节可旋转角度、方向和抓取方式。

3.1 “V”手势仿真

本实验以灵巧手实现 V 手势为例验证灵巧手的各关节可旋转角度和方向。通过观察发现人手在摆出 V 手势时,首先小拇指和无名指的中指节和远指节分别沿相应关节弯曲一定角度、同时大拇指朝着小拇指和无名指远指节所在位置弯曲、然后食指和中指向相对方向侧摆一定角度分开。仿真灵巧手实现 V 手势的过程也是按照这样一个顺序,实时控制各手指关节的旋转角度,观察手指各指节的位置。在仿真过程中食指近指节沿着关节 2 向 $-y_1$ 方向旋转了 20° ,中指近指节沿着关节 2 向 y_1 方向旋转了 15° ,观察发现角度不对称,此时可控制食指近指节沿着关节 2 向 y_1 方向旋转 5° 使角度达到对称。仿真过程如图 6 所示。

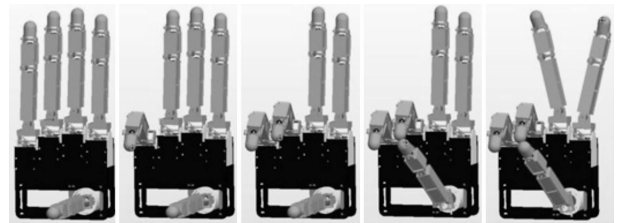


图 6 “V”手势仿真

在控制各指节旋转过程中,各个关节的旋转角度被实时地记录了下来,得出灵巧手达到理想位置时各关节的旋转角度,如表 2 所示。表中数值是相应指节沿着关节 1—4 的旋转角度的绝对值。

表 2 “V”手势手指各关节旋转角度

关节	大拇指/(°)	食指/(°)	中指/(°)	无名指/(°)	小拇指/(°)
1	36	0	0	79	80
2	41	15	15	0	0
3	0	0	0	88	89
4	29	0	0	31	30

在 V 手势仿真的过程中,实时控制灵巧手各个关节的旋转方向和角度,当旋转方向和角度不满足要求时可以实时修改旋转方向和角度,使得仿真过程可逆、可控。

3.2 抓取仿真

本实验通过仿真灵巧手抓取水杯来验证灵巧手抓取能力。抓取过程分为粗抓和精抓两部分,粗抓部分首先灵巧手整体朝水杯把手方向移动,同时无名指和小拇指的中指节和远指节沿手掌方向弯曲,然后移动灵巧手使食指和中指穿过水杯把手。精抓部分微调食指和中指的中指节和远指节旋转角度使食指和中指紧贴水杯把手,同时调整大拇指的位置使其远指节紧贴水杯把手。通过粗抓和精抓相结合不仅节省了仿真时间而且使抓取位置更加合理。仿真过程如图 7 所示。

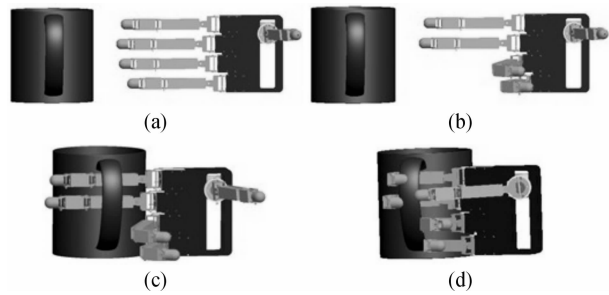


图 7 灵巧手抓取仿真过程

抓取动作完成时灵巧手手指各关节旋转角度如表 3 所示。表中数值是相应指节沿着关节 1—4 的旋转角度的绝对值。

表 3 抓取完成时手指各关节旋转角度

关节	大拇指/(°)	食指/(°)	中指/(°)	无名指/(°)	小拇指/(°)
1	89	0	0	83	82
2	0	0	0	0	0
3	0	84	82	88	88
4	32	77	78	55	50

通过抓取仿真发现灵巧手在抓取的过程中可以像人手一样抓取不规则物体,可以根据物体的形状实时调整抓取姿势,不必提前设置好运动参数,使抓

取更加合理和牢固。

4 结束语

本文在分析了 YWZ 灵巧机械手的机械结构和自由度基础上,建立了灵巧手手指运动学方程,开展了交互式的虚拟灵巧手运动学仿真。仿真结果表明交互式的仿真方法不仅可以形象地观察出每根手指的活动范围,而且在仿真过程中可以实时调整每个关节的旋转方向以及角度,并且可实时地显示出旋转角度,记录运动过程。与传统的运动学仿真方法相比,本方法实现了机械机构在运动仿真过程中的交互功能,使得机械机构的运动仿真更加人性化、更灵活,不必反复设置运动学参数,提高了运动学仿真的效率,可以在一定程度上缩短机械产品的研发时间,降低开发成本。

参考文献:

[1] Okada T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handing[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1982, 12(3): 289-299.

[2] 杨文珍,梁春辉,陈文华,等. ZSTU 拟人灵巧手设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(12): 2617-2622.

[3] 高大华,胡晓兵. 基于 ADAMS 的六自由度关节型搬运机器人运动学仿真分析[J]. 中国制造业信息化, 2010, 39(1): 37-39.

[4] 卞学良,杜青,马振书,等. 危险弹药机器人机械手运动学仿真分析[J]. 现代制造工程, 2010 (6): 129-132.

[5] 邢迪雄,张琦. 基于 CATIA V5 的工业机器人运动学仿真研究[J]. 机器人技术, 2011, 38(1): 57-61.

[6] Yang W Z, Zhang H, Yu S G, et al. Workspace analysis and mechanical innovation of YWZ dexterous hand [C]. Advanced Materials Research, 2011: 557-567.

[7] Song J. A kinematics analysis of eggplant picking robot based on D-H method[C]. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2011: 183-191.

(下转第 842 页)

Based on XBee-PRO CNC Data Transmission System Design

PAN Qing-mei, BAO Min, XU Li-zhen, ZHOU Xiao-wei

(School of Machinery & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To address various problems related to the CNC machine tool numerical control system, such as relying on the RS232 or RS485 serial communication interface, exchanging data with the outside world, and limited machine memory space, this paper proposes a program that uses XBee-PRO Modules ZigBee wireless communications and stored data in the memory chip of the middle layer. The program provides the visual interface to facilitate the viewing of the operating instructions file and document transfer files. This paper presents a convenient, effective, and efficient data transmission system, the results of the complete development and application testing of an integrated management system for the NC program.

Key words: XBee-PRO; ZigBee; ATmega 16L; CNC machine tools; data transmission

(责任编辑: 朱松英)

(上接第 836 页)

Interactive Motion Analysis of the YWZ Dexterous Hand

QIN Cong^a, YANG Wen-zhen^b, ZHANG Hua^b, SHAO Ming-chao^b

(Zhejiang Sci-Tech University, a. School of Informatics,

b. School of Machinery and Automation, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper analyzes the motion characteristics and explains the interactive motion simulation of a dexterous robot hand with multiple degrees of freedom. First, we introduce the mechanical structure and degree of freedom of the YWZ dexterous robot hand. Second, we deduce the kinematic equation of the robot hand via the D-H method. Lastly, we propose a method that makes the motion simulation of the robot hand interactive. The results show that the interactive method can adjust the direction of rotation and the angle of each joint in the simulation process in real time through the optimization grab action. Don't have repeatedly kinematics parameter settings. The method improves the efficiency of the kinematic simulation, which is beneficial to the mechanical structure of the dexterous hand design and control scheme, and helps provide a theoretical basis for the development and actual control of the dexterous hand.

Key words: dexterous robot hand; kinematics analysis; kinematics simulation; interaction

(责任编辑: 朱松英)