

京剧机器人双臂碰撞检测的研究与实现^{*}

□ 徐风华 □ 谈士力

上海大学 CIMS& 机器人中心 上海 200072

摘要:对京剧机器人双臂实时碰撞检测的方法进行了研究。首先,通过机器人运动学求出各关节坐标系间的变换矩阵,获得手臂各关节点在机器人基坐标系下的矢量坐标;然后,建立手臂的几何模型,通过几何法实时检测两手臂的最短距离 D_{min} ,并与碰撞发生的临界距离 d_{max} 进行实时比较,当 $D_{min} < d_{max}$ 时,系统发出暂停信号停止手臂运动;最后利用机器人AS语言,实现了最短距离算法和双臂的通讯,验证了双臂实时碰撞检测方法的可行性。

关键词:京剧机器人 碰撞检测 双臂 AS语言

中图分类号: TH11;TP242

文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2011)03-0007-04

京剧机器人基于机器人技术和中国京剧文化元素,开展了拟人化动作及多机器人群控表演等关键技术研究。对于京剧机器人拟人化动作,必须实现机器人双臂协调功能,而防止双臂间的碰撞则是双臂协调必须面临的难题。因此,笔者展开了对机器人双臂碰撞检测方法的研究,将机器人的每一只手臂作为另一手臂的障碍物,通过检测障碍物与手臂间的最短距离来判断碰撞发生的可能性。

1 京剧表演机器人双臂结构及网络控制系统

1.1 双臂结构

为使手臂在空间拥有大的自由度,能够仿人完成各种复杂动作,采用六自由度关节型机械臂,以川崎(Kawasaki Robot)机器人F系列的FS03为原型。京剧表演机器人的双臂安装结构的三维仿真模型如图1所示,机器人实体如图2所示。

1.2 双臂网络控制系统

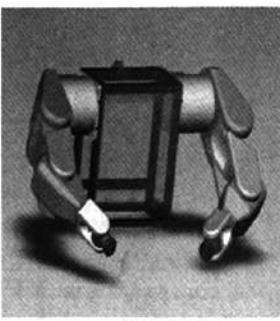
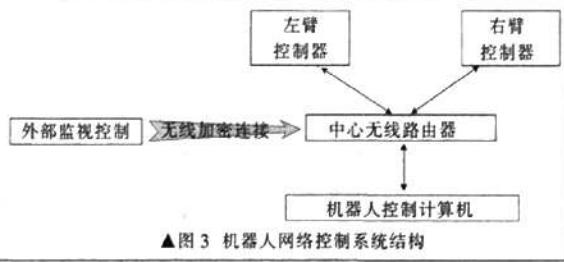
机器人双臂控制系统主要由主控计算机、机器人手臂、机器人手臂控制器、外部监控计算机组成,其系

统结构如图3所示。

采用星形连接的网络拓扑结构,将手臂控制器、主控计算机,或更多的网络设备用中心无线路由器连接起来,外部监控计算机或其它所需的网络设备也可随时通过有线或无线通信动态地加入到控制网络中。由于机器人控制的特殊性,对于外部的无线连接设备实现加密连接来保证机器人的控制网络的安全性和稳定性。

手臂控制器与主控计算机都与路由器采取有线连接在路由器的不同端口上,采用交换式全双工通信模式。主要控制设备之间都不会存在碰撞问题,以提高数据和控制信号的传输速度和实时性。

控制模式实现主从的分层控制结构,手臂控制器完成基本的驱动和动作的执行,保证运动精度。控制计算机则通过规划机器人双臂动作,协调双臂的动作来达到双臂配合的目的。双臂控制器也可通过网络通信,这样在动作执行中进行底层的协调而不通过控制计算机,以保证一些实时要求较强的动作,本文涉及的双臂碰撞检测就是基于此而展开的。除此之外控制计算机将动作归总为行为库,为机器人提供行为决策及动作规划。外部监控计算机可通过无线网络监控机器人状态,辅助机器人控制计算机进行机器人全局决策和规划,同时也能实现机器人远程控制和人机交互^[1]。



▲图1 双臂安装结构图



▲图2 京剧机器人

* 上海市科委重点项目(编号:07DZ05805)

收稿日期:2010年9月

2 机器人双臂模型、坐标系统及变换矩阵的建立

2.1 双臂模型及关节坐标系的建立

机器人双臂的基坐标系如图 4 所示, 单臂的各关节坐标系如图 5 所示。

2.2 运用 D-H 法确定机械臂的各项参数和关节坐标间的转换矩阵

D-H 是由 Denavit 和 Hartenberg 于 1955 年提出的关于求解机器人运动学的方法, 通过 D-H 法确定的机械臂的各项参数我们称为 D-H 参数, 首先我们分析研究操作臂的机构, 以 D-H 法为基础建立各个关节的坐标系和 D-H 参数如表 1 所示。

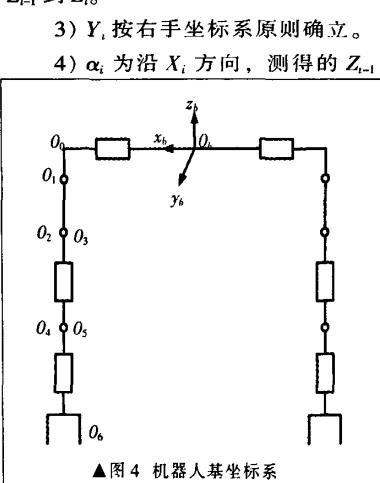
表 1 京剧机器人的单臂连杆及其 D-H 参数

关节	θ_i	$\alpha_i/[^{\circ}]$	a_i/mm	d_i/mm	运动范围/[^{\circ}]
1	θ_1	90	120	0	-160~160
2	θ_2	0	250	0	-60~150
3	θ_3	90	0	0	-150~120
4	θ_4	90	0	250	-360~360
5	θ_5	90	0	0	-135~135
6	θ_6	0	0	80	-360~360

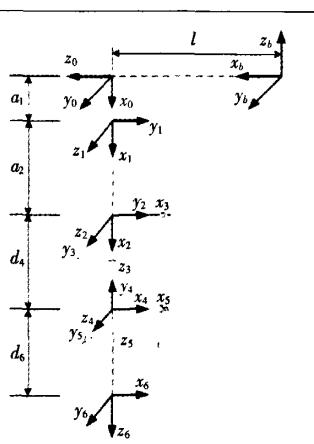
其中，在机器人基体坐标系下，对于右手臂 $\alpha=90^\circ, l=345$ ；对于左手臂 $\alpha=-90^\circ, l=-345$ 。

D-H 法能唯一地描述运动链的结构,也即相邻运动副之间的相对位置和方向^[2]。为此对各杆件进行编号,分别为 $1, 2, \dots, n$, 其中第 i 个运动副连接第 $i-1$ 个杆件。定义坐标系 F_i 的原点为 O_i , 轴为 X_i, Y_i, Z_i 。坐标系 F_i 固定在第 $i-1$ 个杆上, $i=1, 2, \dots, n+1$ 。前 n 个坐标系建立的规则如下:

- 1) Z_{i-1} 沿第 i 关节运动轴的方向。
 - 2) X_i 定义为同时与 Z_{i-1} 轴和 Z_i 轴垂直, 方向为从 Z_{i-1} 到 Z_i 。
 - 3) Y_i 按右手坐标系原则确立。
 - 4) α_i 为沿 X_i 方向, 测得的 Z_{i-1}



▲图4 机器人基坐标系



▲图5 单臂的关节坐标系

到 Z_i 的距离; α_i 为沿 X_i 方向测得的, Z_{i-1} 到 Z_i 的转角; θ_i 为沿 Z_{i-1} 方向测得的 X_{i-1} 到 X_i 的转角; d_i 为沿 Z_{i-1} 测得的 X_{i-1} 到 X_i 的距离。

根据以上规则,各关节坐标系的转换矩阵如下:

$$\begin{aligned}
{}^0T_1 &= \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & a_1 c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & a_1 s_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^2T_3 &= \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & 0 \\ s_3 & 0 & -c_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3T_4 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^4T_5 &= \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

当 6 个关节的坐标及其变换确定后, 可得出各个目标矩阵 ${}^bT_1, {}^bT_2, {}^bT_3, {}^bT_4, {}^bT_5, {}^bT_6$ 。这里的目标矩阵是指各关节坐标在机器人基坐标系下的变换矩阵, bT_i 的表示如下:

$${}^bT_6 = {}^bT_0 \cdot {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6$$

$$= \begin{bmatrix} n & s & a & {}^b\mathbf{o} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & 0 \\ n_y & s_y & a_y & 0 \\ n_z & s_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, 6o 是第 6 关节基体坐标系原点在机器人基体坐标系下矢量, 即第六关节点的坐标 ${}^6(o_x, o_y, o_z)$ 。依此类推可分别得到各个关节点在基体坐标系的坐标。

3 避撞检测的几何算法

京剧表演机器人的各臂都为串联6自由度关节型机械臂,由6条连杆通过关节点固定,为研究方便可将其视为6条有向线段的串联连接^[3],上面的关节点即为每条有向线段的起始端,上面第三部分已经求出各关节点的坐标,因此该6条有向线段的位置在空间基坐标系中即可实时检测到。

两手臂间的最短距离 D_{mn} 定义为左臂与右臂上任意两点连线的最短距离。需要强调的是这里将双臂视为有向线段的连结，实际的手臂是具有一定半径的直圆柱面或锥面，因此实际的最短距离应为 $D_{mn}=d_{mn}-d_0$ ，其中 d_{mn}

为手臂视作连杆时两臂间的最短距离, d_0 为手臂连杆的直径。计算 d_{mn} 可以转化为计算左右臂上任意两根连杆的最短距离, 即计算两条空间线段的最短距离。

异面直线的最短距离指的就是公垂线的长度, 计算方法很多, 还可以计算出最短距离点对。但在本文应用中, 需要求出异面线段的最短距离。区别在于, 异面线段的最短距离不一定就是公垂线的距离。换句话说, 异面线段的最短距离点对必须都落在每条线段里面, 而不能在线段的延长线上。本文提供的三维空间两线段的最短距离算法如下:

1) 如果两条线段异面或相交, 那么首先判断公垂线的最小距离点对是否分别在两条线段上。如果在, 那么公垂线距离为最短距离, 直接返回该值。

2) 如果最小距离点对不在其上, 或者两条线段平行, 那么直接把每条线段端点到另一条线段的最短距离进行比较即可。

3.1 求异面线段的公垂线长度^[4]

如图 6, 两异面线段 $A_1B_1, A_2B_2, \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 分别为两线段的方向余弦。则两线段上的任意一点 M_1, M_2 坐标分别为:

$$M_1 = A_1 + \lambda_1 \mathbf{n}_1 \quad (1)$$

$$M_2 = A_2 + \lambda_2 \mathbf{n}_2 \quad (2)$$

其中 λ_1, λ_2 分别为对应的比例因子。若 M_1, M_2 为两线段的公垂线段, 则:

$$(M_2 - M_1) \cdot \mathbf{n}_1 = 0 \quad (3)$$

$$(M_2 - M_1) \cdot \mathbf{n}_2 = 0 \quad (4)$$

由式(1)、(2)得:

$$M_2 - M_1 = A_{12} + \lambda_2 \mathbf{n}_2 - \lambda_1 \mathbf{n}_1 \quad (5)$$

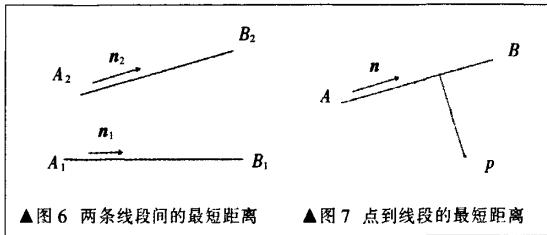
其中 $A_{12} = A_2 - A_1$, 由式(3)、(4)、(5)可得出:

$$\lambda_1 = a + \lambda_2 b \quad (6)$$

$$\lambda_2 = (ab - c) / (1 - b^2) \quad (7)$$

其中 $a = A_{12} \cdot \mathbf{n}_1, b = \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2, c = A_{12} \cdot \mathbf{n}_2$, 由式(6)、(7)代入式(1)、(2)即可确定公垂线 M_1M_2 长度。

通过式(1)、(2)计算出的 M_1, M_2 坐标即可判断其是否在对应的线段 A_1B_1, A_2B_2 上。根据上面对异面线段算法的规则描述, 当 M_1, M_2 在线段上时, 最短距离 $d_{mn} = |M_1M_2|$; 否则 d_{mn} 为每条线段端点到另一条线段的最短距离中的较小者。接下来只要求解点到线段的最短距离即可。



▲图 6 两条线段间的最短距离

▲图 7 点到线段的最短距离

3.2 点到线段的最短距离

点到直线的求法与异面直线求解类似且更简单, 如图 7 所示, 线段 AB 和线段外一点 P, \mathbf{n} 为线段 AB 的方向余弦。则线段上任意一点 M 的矢量坐标可表示为:

$$M = A + \lambda \mathbf{n} \quad (8)$$

式中: λ 为比例因子。

当 MP 为点 P 到线段 AB 的垂线时:

$$(M - P) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得:

$$\lambda = -AP \cdot \mathbf{n} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)即可确定垂足点 M 的坐标。点到线段的最短距离 d 可由下面规则判断:

1) 当点 M 在线段 AB 上时, $d = |MP|$ 。

2) 当点 M 在线段 AB 延长线上时, d 为点 P 到线段两端点距离中的较小者。

4 算法程序的实现

川崎机器人的 AS 语言系统提供了两种类型的程序^[5]: 机器人控制程序和 PC 程序 (Process Control 程序, 过程控制程序)。机器人控制程序是那些控制机器人动作的程序, 控制手臂以不同的方式运动, 机器人手臂只能运行一个控制程序。PC 程序是指与机器人控制程序同时执行的那些程序, 不能执行机器人的动作命令, 一般被用来控制和监控外部 I/O 信号, 机器人可最多同时运行 5 个 PC 程序。PC 程序可以被设置成在控制电源开启时自动启动, 它可以在后台运行过程中与机器人控制程序并行运行。因此可利用 PC 程序实时检测双臂间的最短距离 D_{mn} , 并与两手臂碰撞的临界距离 d_{max} 实时比较。PC 程序和机器人控制程序可以通过共同使用的变量和内部信号来相互通信, 当碰撞即将发生时, 立即发出内部暂停信号给机器人控制程序。

机器人控制器的网络部分提供了两个功能, 一个是远程终端的功能, 另一个是基于 TCP/IP 的 Socket 通讯功能, 并由相应的 AS 语言实现。TCP 与 UDP 通信各有不同的优缺点, TCP 为面向连接, UDP 为面向传输。在网络条件下控制的机器人手臂进行运行如果发生数据包丢失会造成很多不良后果, 如动作缺步, 甚至于安全问题。所以采用 TCP 通信方式进行两机械臂的数据交换。例如, 机器人的一个手臂可通过该通信程序获取另一个手臂上各点的位置、位姿等数据。机器人两手臂还可通过共同的外部监控信号来控制它们的同步运动, 以减少运动的不确定性, 减少碰撞的未知性。

结合机器人专用的 AS 语言系统的上述功能, 以及本文第三部分所描述的几何算法, 编写了实现碰撞检测的算法程序, 证明了该方法是可行的。

气动肌肉驱动的康复机器人关节建模及位置模糊控制*

□ 王建 □ 江先志

华中科技大学 机械科学与工程学院 武汉 430074

摘要:肢体康复机器人运动速度低、位置精度要求不高,但柔顺性和安全性要求高。气动肌肉是一种新型柔性驱动器,适合于康复机器人的驱动。气动肌肉具有时滞、非线性等特点,关节位置控制难度增大。由此建立了关节模型,采用了模糊控制技术,借助 MATLAB 的 Simulink,得到模糊控制查询表。实验表明,本控制算法较好地实现了关节位置控制。

关键词:气动肌肉 康复机器人 关节建模 模糊控制 Simulink

中图分类号:TH138;TP24

文献标识码:A

文章编号:1000-4998(2011)03-0010-04

近年来,机器人应用领域不断扩大,技术进步使得越来越多的机器人出现在人们的日常生活中。很多场合机器人直接与人打交道,如康复医疗机器人。机器人的柔顺性和安全性显得格外重要^[1]。在人们日益增加对机器人柔顺性、灵活性和安全性的需求面前,传统机器人驱动方式如电机、液压缸在某些场合显得不太合适。而气压传动由于工作介质空气的可压缩性,表现出很好的柔顺性,气动方式尤其是气动肌肉在这些场合正成为机器人关节驱动的关注热点。

气动肌肉是一种新型驱动器,具有仿生特点,模仿动物肌肉,充气后收缩,产生驱动作用。气动肌肉结构比较简单,由橡胶管和高强度纤维网组成,但它的初始力比同径气缸大很多,输出力大。在收缩一段长度后,输出力变小,柔顺性和安全性好。正是由于气动肌肉结构简单,使用方便,价格低,柔顺性、安全性好,在机器人驱动方面应用越来越多,表现出比电机、液压缸、气缸更好的

特性^[2-4]。图 1 是 FESTO 公司生产的气动肌肉产品。



▲图 1 FESTO 公司气动肌肉

本文建立了气动肌肉静态模型及康复机器人关节模型。针对气动肌肉驱动的穿戴式康复机器人关节,以肩关节为例,采用模糊控制方法,进行关节位置闭环控制。借助于 MATLAB 的 Simulink,完成模糊推理并得到模糊控制查询表,从而使算法计算量小、运算快。简单有效地实现康复机器人关节位置控制。

1 气动肌肉静态特性及康复机器人关节结构

气动肌肉是非线性元件,产生的输出力与气压 p

* 国家科技支撑计划项目(编号:2008BAIS0B04)

国家 863 高技术研究发展计划项目(编号:2008AA040202)

收稿日期:2010 年 9 月

5 总结和展望

作者解决了京剧机器人双臂在运动过程中产生碰撞的问题。通过机器人运动学知识获取手臂各关节点的位姿信息,运用几何算法计算出两手臂的最短距离,最后用机器人专用的 AS 语言系统编写相应程序,验证了方案的可行性。本文的缺陷是在检测到碰撞将要发生时,只是暂停手臂的运动,在突发情况下,京剧机器人表演不能正常进行。因此,将来工作有待于完善机器人的双手协调和运动规划,以加强京剧机器人表演的流畅性。

参考文献

[1] 李一青. 基于视觉的机器人双臂控制系统及其导航的研究

[D]. 上海:上海大学, 2009:21-29.

- [2] Jorge Angles, 宋伟刚译. 机器人机械系统原理理论、方法和算法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] Sukhan Lee, Hadi Moradi, Chunsik Yi. A Real-Time Dual-Arm Collision Avoidance Algorithm for Assembly [J]. Journal of Robotic Systems 2001, 18(8): 477-486.
- [4] Seraji H, Bon B, Steele R. Experiments in Real-time Collision Avoidance for Dexterous 7-DOF Arms [J]. Conf. on Robotics and Automation, 1997(1):569-574.
- [5] 川崎机器人控制器 D 系列 AS 语言参考手册 [Z]. 日本:川崎重工株式会社, 2005.

(编辑 林凡)

