

一种超冗余机械臂的蛇形避障运动算法研究

徐贤统 王程 王承震

(浙江大学机械工程学院 浙江 杭州 310027)

摘要: 超冗余蛇形机械臂的高自由度特性带来高灵活性、高避障性能的同时,也带来了更复杂的运动学算法的挑战。而机械臂运动学算法的优劣不仅可以直接影响其运动的灵活性与避障性能,还关乎其本身能否高效可靠运行。为此,本文建立了蛇形机械臂高效化的运动学模型,针对现有运动学算法或繁琐复杂、或未考虑运动过程中关节转角限制要求等问题,提出了一种变种蛇形避障算法,使得机械臂可以到达任何极限位姿状态,在保证优秀避障性能的同时兼顾了实时控制要求。

关键词: 蛇形机械臂; 运动学建模; 避障; 实时控制

0 引言

随着人类对大自然探索的范围越来越广、程度越来越深,越来越多的领域开始面临非结构化的复杂作业环境,同时针对这类特殊环境所提出的作业要求也越来越高,因此传统刚性关节型机械臂也越来越难以完成作业任务要求。针对这类特殊需求,仿生机器人领域提出了超冗余自由度机器人这一概念,其外形通常类似蛇、象鼻、章鱼触手等。本文研究的绳驱蛇形机械臂属于超冗余机器人范畴,其空间通过能力远大于传统机器人,能够在实现末端执行器执行作业任务的同时,保证后续关节可靠避障。但与此同时,新型机械臂也带来了新的运动控制难题。

在下面的内容中,首先介绍一种绳驱蛇形机械臂,并对其进行运动学建模;然后提出了蛇形避障运动学算法,通过优化机械臂在极限位姿时的机械臂参数,不仅扩大了机械臂可达空间范围,同时兼顾良好的避障性能与实时控制要求;最后为了验证算法的有效性,进行了仿真与实验分析。

1 运动学建模

1.1 蛇形机械臂机械结构

本文研究的蛇形机械臂机械结构如图1所示,包括基座、直线导轨系统、固定连杆、连杆、转动关节,其中机械臂的臂体部分由数根连杆以及转动关节依次串接而成。每个转动关节都采用万向节形式,包括两个自由度,并以三根绳索驱动。

蛇形机械臂基座可以在直线导轨上前后移动,同时同步控制机械臂各转动关节,机械臂末端便能抵达目标位置。

1.2 蛇形机械臂运动学建模

如图2所示,本文主要采用了万向节自然坐标系法

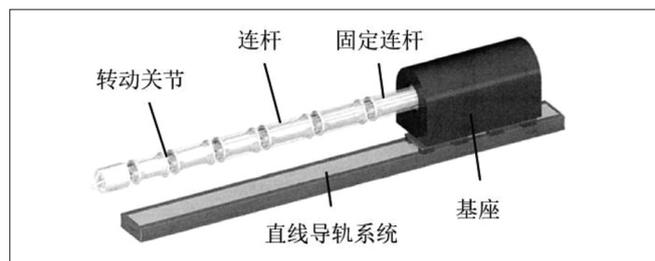


图1 蛇形机械臂机械结构

建立运动学模型。以连杆*i*为例,以第*i*个万向节中心为原点;以连杆*i*的轴心线为*x_i*轴,方向指向远端;以连杆*i*的近端旋转副中心轴为*z_i*轴,方向为径向;最后以右手系规则得到*y_i*轴,*y_i*轴与本级连杆的远端旋转副中心轴平行。其坐标变换矩阵为:

$${}^{i-1}T_u = \text{Trans}(l_{i-1}, 0, 0) \times \text{TRot}_y(\alpha_i) \times \text{TRot}_z(\beta_i) \\ = \begin{bmatrix} C\alpha_i C\beta_i & -C\alpha_i S\beta_i S\alpha_i l_{i-1} & 0 & 0 \\ S\beta_i & C\beta_i & 0 & 0 \\ -C\beta_i S\alpha_i & S\beta_i S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:*l_i*—第*i*节连杆长度;

α_i —绕*Y*轴的方向节关节转角, $\alpha_i \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$;

β_i —绕*Z*轴的方向节关节转角, $\beta_i \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$;

u_i—万向节自然坐标系中第*i*坐标系。

2 蛇形避障运动算法

2.1 常规蛇形避障运动模式

蛇形避障运动算法分为两步:第一步生成蛇形避障路径;第二步迫使机械臂拟合蛇形避障路径。机械臂初始状态呈水平直线,且该直线平行于基座平移自由度,则蛇形避障路径包括机械臂初始直线段与末端自由运动路径两部分。本文主要采用直线段连接避障拐角点的方式生成蛇形避障路径。线性连接拐点的方式简单实用,便于后续进行理论研究与分析,而且大量实验表明该方

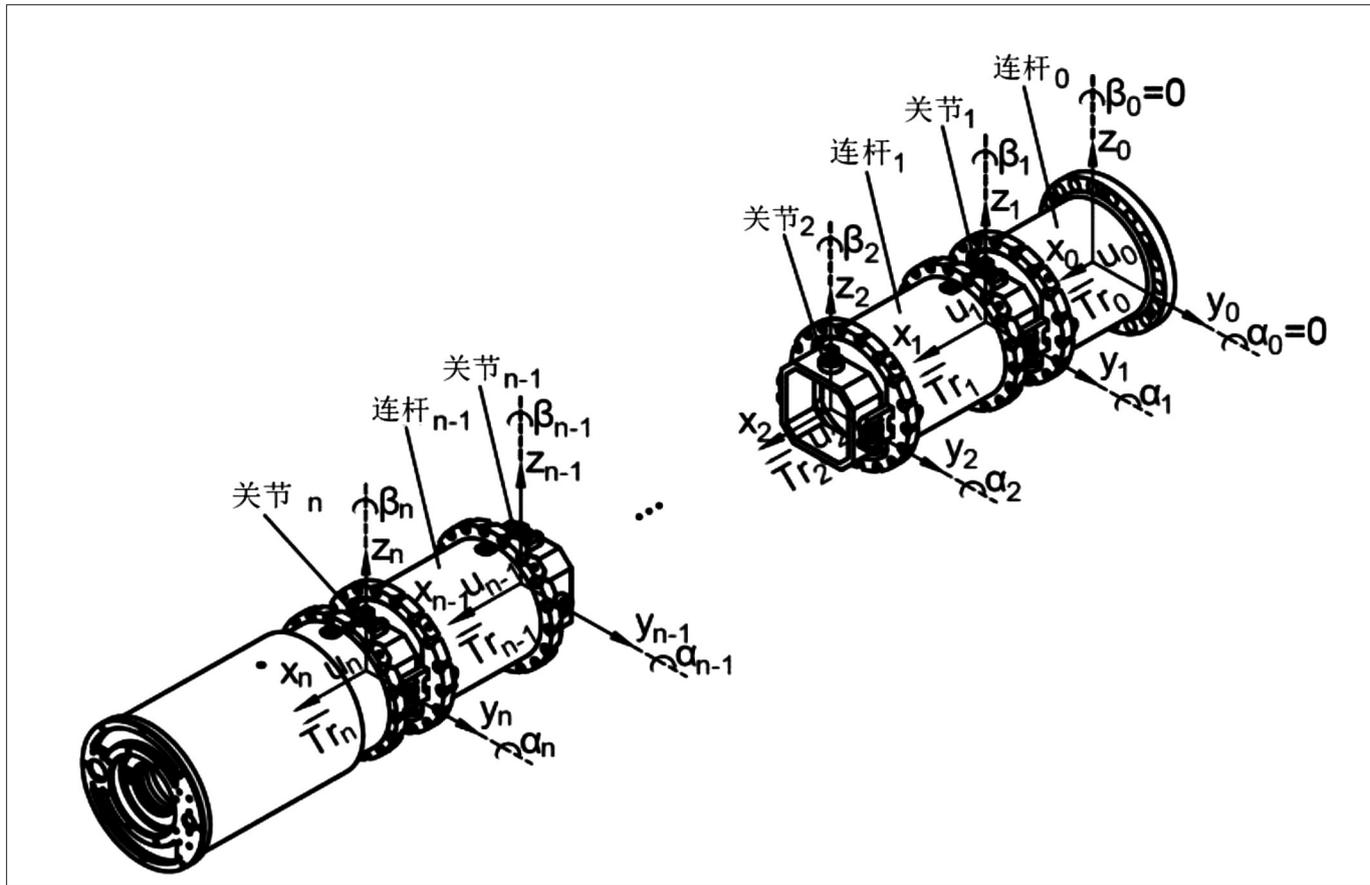


图2 万向节自然坐标系法

式生成的蛇形避障路径在实际应用中同样能满足平滑运动需求。

如图3所示,先迫使各关节中心点始终在蛇形避障路径上,然后根据几何关系推导出各个关节的位置。单节连杆的拟合算法主要涉及两个方程:连续性方程和路径约束方程。

$$\|\overrightarrow{L_i L_{i+1}}\|^2 = l_i^2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = f(t) \\ y = g(t) \\ z = h(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: l_i - 第 i 节连杆近端位置, 即关节 i 位置;

$\overrightarrow{L_i L_{i+1}}$ - 点 l_i 到点 l_{i+1} 的向量;

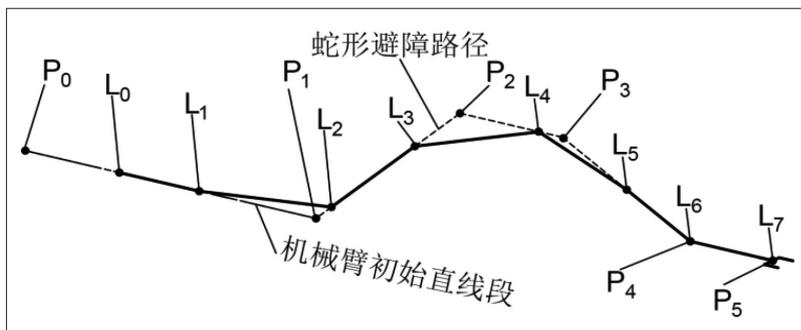


图3 蛇形避障算法运算过程图

l_i - 第 i 节连杆长度;

t - 避障路径参数方程自变量。

式 (2) 为连杆 i 的连续性方程。式 (3) 为路径约束方程。若已知 L_i , 则由上述方程可以得到 L_{i+1} ; 反之, 若已知 L_{i+1} , 则可以得到 L_i 。机械臂末端位置 L_{n+1} 作为目标位置是已知条件, 因此结合方程 (2) 和 (3), 可递推得到各连杆的近、远端位置, 而 L_0 限制在调整自由度所在直线上。

2.2 变种蛇形避障运动模式

常规蛇形避障算法中, 机械臂理论可达极限位姿并不等于实际可达位姿, 即蛇形运动过程中机械臂关节会出现超出最大转角限制的情况。为解决此问题, 本文修改了机械臂拟合蛇形避障路径的方式。设关节转角极限值为 θ_m 。如图4所示, 按常规蛇形运动模式算法, 则关节5、关节6的位置分别在B、C两点, 此时关节6转角 $\theta_r > \theta_m$ 。于是在BC、CD所确定的平面内, 更改关节5的位置从B到B', 使得关节6转角等于 θ_m 。然后使关节1、关节2、关节3、关节4继续拟合原有蛇形避障路径, 若仍有某个关节 i 转角大于 θ_m , 则同理更改关节 $(i-1)$ 的位置, 使得关节 i 转角等于 θ_m 。上述方式是通过更

改关节编号更小的关节位置，同理也可采用更改编号更大的关节位置的方式。

3 仿真与实验

3.1 仿真分析

本文从两方面仿真分析蛇形避障运动算法性能。

(1) 工作空间可达性分析。如图5所示，黄线表示蛇形避障路径，机械臂沿着此路径前进时，最后会达到极限位姿状态，若采用常规蛇形避障方法，则运动过程中关节转角超限。若采用变种蛇形避障算法，则每个关节都在以最大能力，但并不超限的方式逼近预定关节转角。因此，只要最终的目标位姿各关节转角没有超限，则机械臂就能顺利到达。

(2) 避障能力分析。蛇形避障运动算法要求机械臂各关节中心始终沿着蛇形避障路径运动，因此保证了末端执行器执行作业任务的同时，就能保证其他后续关节的可靠避障。如若常规蛇形避障运动算法违反最大转角

限制要求，则变种蛇形避障运动算法要求各关节以其极限能力逼近预定蛇形路径，因此也具有较好的避障性能。利用三维仿真方法绘制机械臂在运动过程中所形成的包络面，通过包络面的几何外形可以分析机械臂蛇形前进时所必要的通过空间。机械臂以变种蛇形避障算法沿着蛇形避障路径前进时，包络面成细小长条状，因此具有优良的避障能力。

3.2 实验测试

实验结果表明：机械臂的运动平滑且避障能力良好。尤其是变种蛇形避障算法，能够兼顾最大转角限制要求的同时，其单步运算平均耗时均在 $2\ \mu\text{s}$ 以内，完全满足实时控制需求。

4 结语

本文首先分析蛇形机械臂的运动学建模方法，并提出了蛇形避障运动算法。该算法使机械臂可以抵达各种极限位姿，且保证了蛇形机械臂的优异避障能力以及控制算法效率，满足实时控制要求。本研究接下来将进一步拓展蛇形避障运动算法，使其不仅满足机械臂末端点到点的运动，还能实现扫描观察或焊接物体表面等需求。

基金项目：国家重点研发计划(2018YFB1306702)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(226-2022-00016)；流体动力与机电系统国家重点实验室自主课题(SKLoFP_ZZ_2106)。

参考文献：

- [1] 李鲁亚, 杨宗照, 张启先. 冗余自由度机器人研究[J]. 机器人, 1991, 13(6): 29-33.
- [2] M. W. Hannan, I. D. Walker. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots[J]. J. Robot. Syst, 2003, 23(2): 45-63.

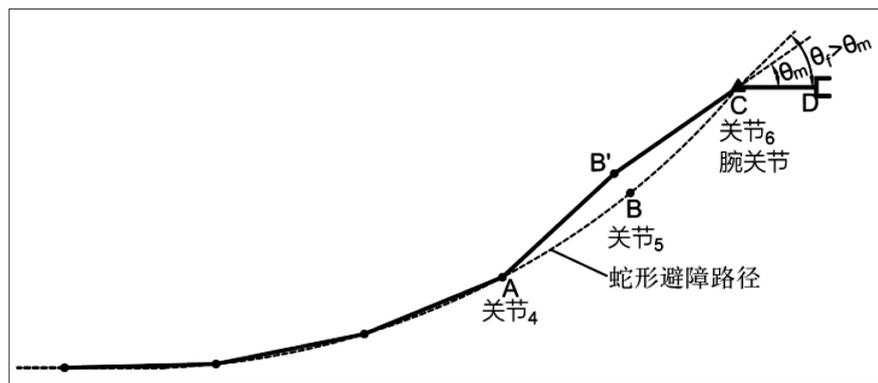


图4 修改拟合蛇形避障路径的方式

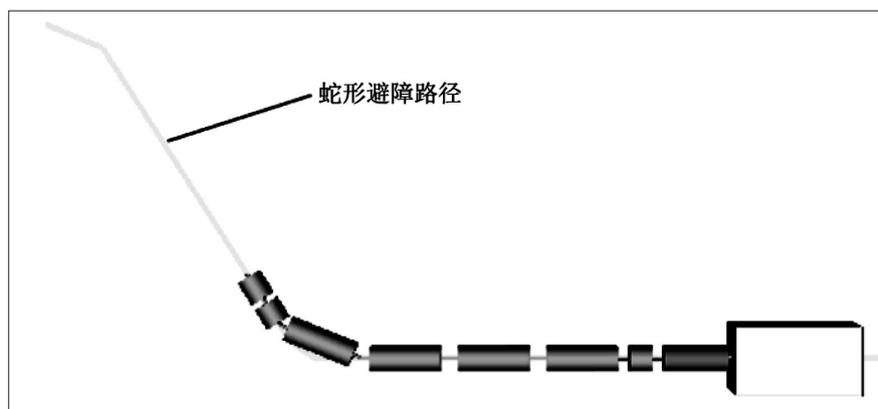


图5 机械臂沿着蛇形避障路径仿真运动