绳驱动机器人的解耦分析和位置控制仿真

陈伟海 王辉华 于守谦 雷银照

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为提高机器人的负载能力,基于几何分析和螺旋理论的基本原理,对绳驱动拟人臂机器人的构型设计、钢绳传动方式和运动学控制问题进行了深入的分析. 首先针对绳驱动走线方式的多样性选择,设计了一种具有肘、腕关节耦合和肩、肘关节耦合的绳驱动传动机构;然后以肩、肘、腕 7-DOF 关节为中间媒介对机器人末端和驱动钢绳间的运动学关系进行了分析,即先考虑机器人末端位姿和各关节角度之间的关系,再研究各关节角度和其相应的驱动钢绳绳长之间的关系,从而得到绳驱动机器人的运动学解;最后进行了仿真研究. 仿真结果显示机器人的关节角度和绳长变化曲线十分平滑,末端的实际轨迹跟踪理想轨迹的误差非常微小,说明建议的算法正确,绳驱动机器人运行理想,可以有效克服常规机器人自重过大带来的负面影响.

关 键 词: 绳驱动; 拟人臂; 机器人; 运动学; 并联机构

中图分类号: TP 242

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)01-0094-06

Decouple analysis and simulation of displacement control for cable-driven manipulator

Chen Weihai Wang Huihua Yu Shouqian Lei Yinzhao

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the load capacity of the manipulator, based on the geometry analysis and screw theory, the configuration design, cable-driven manner, and kinematics control for a cable-driven humanoid-arm manipulator were analysed. Firstly, aiming at the choice of cables-driven manners, a cable-driven mechanism that is coupled between elbow and wrist, and between shoulder and elbow was designed. Secondly, taking the 7-DOF joints such as the shoulder, elbow and wrist as medium, the relationship between the end-effector and driven cables was analyzed, i. e. through considering the relationship among the end-effector's pose and joint angles firstly for the manipulator, and then considering the relationship among joint angles and corresponding length of cables, the kinematics of cable-driven manipulator can be solved. Lastly the simulation was realized. The simulation results show that the curves of manipulator's joint angles and length of cables are very smooth, and the error between actual trajectory and ideal trajectory of the end-effector is very small. These prove that the proposed algorithm is correct, the cable-driven manipulator runs well, and proposed approach can effectively overcome the negative effects from general robot brought by its deadweight.

Key words: cable-driven; humanoid-arm; robot; kinematics; parallel mechanism

绳驱动机器人与常规驱动机器人相比的不同之处在于采用钢绳而不是刚性连杆来驱动自身重量以及负载,它发展于上世纪四五十年代,并应用于核工业[1]. 其运动部分比常规驱动机器人质量

收稿日期: 2005-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375008,60575052)

作者简介: 陈伟海(1955—),男,浙江象山人,副教授, whchenbuaa@126.com.

小,这使得它有以下优点:①可以产生很大的加速度和速度,具有较小的惯性;②负载能力大;③工作空间大;④能耗小,组装系统经济[2-3].然而由于驱动绳的单向性,即只能拉伸不能推动的特性[4],使得绳驱动机器人的驱动控制不同于常规驱动机器人.虽然绳驱动机器人的机构本体是串联的,但它的驱动方式却是属于并行机构的[5-6].

绳驱动拟人臂机器人的动作相似于人臂运动,具有较好的灵活性,可以在科学研究、海港和海洋船舶吊运、航天、医学及虚拟现实等领域得到广泛的运用[7-9].拟人臂机器人的灵活性来源于它的冗余特性.北航机器人所 93 年成功研制 BUAA-RR 七自由度机器人,它可进行避障、避关节角极限、避奇异等冗余控制.但由于电机都位于机械臂的关节处使得自身重量增加,连杆也必然粗而重,造成机器人带载能力下降,运动灵活性也受到影响.

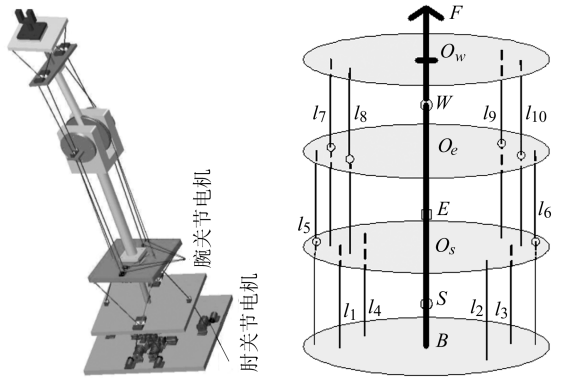
基于人臂结构分析,BUAA-RR 七自由度机器人和绳驱动机器人的研究[10-12],本文设计了一套绳驱动拟人臂机器人系统,它具有 BUAA-RR 七自由度机器人的冗余控制特点和绳驱动机器人的优点.

文中首先对拟人臂机器人的本体机构进行研究;接着设计了具有肘、腕耦合和肩、肘耦合的绳驱动传动机构,并应用几何分析的方法对其中各个关节之间的耦合关系进行解耦分析;然后对机器人系统建立运动学模型并进行前向和逆向的运动学分析和研究,最后给出一组仿真结果,对解耦分析和前向、逆向运动学研究进行了验证.

1　拟人臂系统结构的设计与分析

人臂由肩关节、肘关节、腕关节以及臂骨、手的筋脉肌肉等组成,其中肩关节、腕关节类似于球关节,肘关节类似于单方向的旋转关节.手臂以骨骼作为支架,而筋脉肌肉则为手臂运动的驱动动力来源.

本文设计的拟人臂关节分为 3 部分:肩关节、肘关节、腕关节.其中肩关节和腕关节用球关节起支撑作用,肘关节则用旋转关节.3-DOF 的球关节和 1-DOF 的旋转关节都是被动关节,不起驱动作用,机器人运动由电机通过钢绳驱动.由于绳的单向性,每个关节驱动绳条数至少比其自由度数大 1 才能使该关节处于完全约束状态.因此,如图 1 所示,本文的机器人系统共用钢绳 10 条,其中肘关节为 2 条,肩关节和腕关节都为 4 条,为最少钢绳条数.由于机器人关节空间自由度大于任务空间的自由度,所以整个机器人系统为冗余机器人.



a　机械结构图　　b　绳驱动传动图

图 1　拟人臂机器人的结构

图 1a 是机器人系统的机械结构图.由图可看出,肩关节和肘关节的驱动绳由基座上的电机驱动,腕关节的驱动绳由肩关节上的电机驱动.图 1b 中 S,W 是球关节,E 是旋转关节,S 为肩关节,W 为腕关节,E 为肘关节.l_1,l_2,l_3,l_4 为肩关节 S 的驱动绳,l_5,l_6 为肘关节 E 的驱动绳,l_7,l_8,l_9,l_{10} 为腕关节 W 的驱动绳.F 为末端执行器,B 为基座,O_s,O_e,O_w 分别为肩关节、肘关节、腕关节的运动平台,用来作为支架固定钢绳.l_7,l_8,l_9,l_{10} 的固定端在腕关节运动平台 O_w 上,经过肘关节运动平台 O_e 上的穿越孔连接到肩关节运动平台 O_s 上,l_5,l_6 的固定端在肘关节运动平台 O_e 上,经过肩关节平台 O_s 的穿越孔连接到基座 B 上.l_1,l_2,l_3,l_4 的固定端在肩关节运动平台 O_s 上,另一端连接到基座 B 上.

为了保证绳驱动机器人重量轻、速度快的优势,驱动绳的电机本应全部放置在基座 B 上,但是这样肩关节处将会有 10 根钢绳穿过,耦合非常严重.为此本文设计的系统如图 1b 所示,肩关节和肘关节驱动绳的电机安放在基座 B 上,而腕关节的驱动电机则安放在肩关节的运动平台 O_s 上.这样机器人的重心大为下降,只有腕关节的 4 个小电机的重量由肩关节的运动平台承受,于是肘关节和腕关节的运动性能可有很大提高.由于腕关节的驱动绳从肩关节运动平台上的电机一直拉伸到腕关节运动平台上的固定点,必然会从肘关节穿过,因此会产生耦合.同样,肘关节的驱动绳是从肘关节在基座 B 上的电机一直拉伸到肘关节运动平台 O_e 上的固定点,必须从 3-DOF 肩关节穿过,因此肩、肘关节也存在耦合.

另外由图 1a 看出:可先对肩、肘关节和肘、腕

关节间的耦合进行解耦分析,然后对这些关节进行驱动绳的绳长分析,最后以各个关节的关节角为中间变量进行整个机器人系统的运动学分析.

2 运动学分析

2.1 系统解耦分析

对于肘关节和腕关节的耦合,将腕关节的4根钢绳固定在肩关节运动平台 O_s 上对称布置的4点,如图2所示,则腕关节的驱动绳 l_7,l_8,l_9,l_{10} 受肘关节运动影响的绳长部分 $l_7^e,l_8^e,l_9^e,l_{10}^e$ 随着肘关节的旋转对称的改变. 如肘关节旋转角为 θ_4,有

$$\left.\begin{aligned} l_7^e = l_8^e = \sqrt{L_1^2+L_2^2-2L_1L_2\cos(\pi-\alpha-\beta+\theta_4)} \\ l_9^e = l_{10}^e = \sqrt{L_1^2+L_2^2-2L_1L_2\cos(\pi-\alpha-\beta-\theta_4)} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

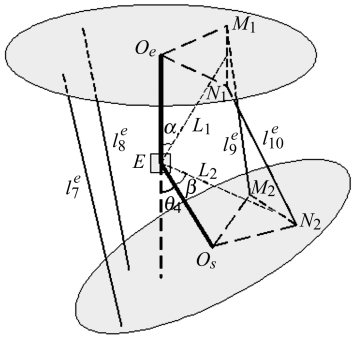


图2 腕、肘关节耦合关系

图2中 θ_4 为肘关节 E 的旋转角. $l_7^e,l_8^e,l_9^e,l_{10}^e$ 在两平台 O_e,O_s 上对称布置. M_1,N_1 为 l_9,l_{10} 在 O_e 上的穿越孔,M_2,N_2 则为 l_9,l_{10} 在 O_s 上的穿越孔,L_1,L_2 分别为 E 点到 M_1,N_1 的中点和到 M_2,N_2 的中点的距离,α 为 M_1,N_1 的中点与 EO_e 的夹角,β 为 M_2,N_2 的中点与 EO_s 的夹角,L_1,L_2,α,β 均为已知.

将球关节看作绕三轴做旋转运动的运动关节组合,则肩关节 S 相对于基础坐标系的位姿矩阵可表示成 $\boldsymbol{T}_{0,1}(\theta_1),\boldsymbol{T}_{1,2}(\theta_2),\boldsymbol{T}_{2,3}(\theta_3)$,类似于肘、腕关节的解耦,肩、肘关节的解耦是求出肘关节驱动绳绳长 l_5 和 l_6 由肩关节运动引起的变化,即已知肩关节旋转角 $\theta_1,\theta_2,\theta_3$,求肘关节的驱动绳 l_5,l_6 受肩关节运动影响的绳长部分 l_5^s 和 l_6^s. 由图3有

$$\boldsymbol{P}_{SE_2} = \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\boldsymbol{P}^o_{SE_2} \tag{2}$$

式中,$\hat{\boldsymbol{w}}_1,\hat{\boldsymbol{w}}_2,\hat{\boldsymbol{w}}_3$ 为肩关节分别绕三轴旋转的运动旋量;$\boldsymbol{P}^o_{SE_2}$ 为 S 到 E_2 的初始矢量;$\boldsymbol{P}_{SE_2}$ 为肩关节旋转后 S 到 E_2 的矢量.

如图3所示,E_2,F_2 是 l_5,l_6 在肩关节运动平台 O_s 上的穿越孔,G_2,H_2 是 l_5,l_6 在基座 B 上的固定点,l_5^s,l_6^s 对称布置.

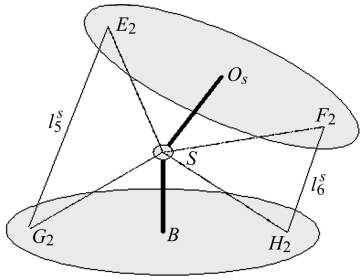


图3 肩、肘关节耦合关系

$\boldsymbol{P}_{G_2S}$ 是 G_2 到 S 的矢量,是一固定矢量,由此可得

$$l_5^s = \| \boldsymbol{P}_{SE_2} + \boldsymbol{P}_{G_2S} \| = \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\boldsymbol{P}^o_{SE_2} + \boldsymbol{P}_{G_2S} \| \tag{3}$$

同理得到

$$l_6^s = \| \boldsymbol{P}_{SF_2} + \boldsymbol{P}_{H_2S} \| = \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\boldsymbol{P}^o_{SF_2} + \boldsymbol{P}_{H_2S} \| \tag{4}$$

式中,$\boldsymbol{P}^o_{SF_2}$ 是 S 到 F_2 的初始矢量;$\boldsymbol{P}_{SF_2}$ 是肩关节旋转后 S 到 F_2 的的矢量;$\boldsymbol{P}_{H_2S}$ 是 H_2 到 S 的矢量.

至此,肘、腕关节及肩、肘关节的解耦关系全部求解完成.

2.2 前向运动学分析

系统的前向运动学指已知各关节驱动绳绳长 $l_1,l_2,\cdots,l_{10}$,求解末端执行器 F 的位姿 $\boldsymbol{T}(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_7)$.

腕关节和肩关节都是被动球关节,可以将它们看作绕三轴旋转的运动关节组合. 因此,系统可表示成7个关节的运动,系统的前向运动学可表示为

$$\boldsymbol{T}(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_7) = \boldsymbol{T}_{0,1}(\theta_1)\boldsymbol{T}_{1,2}(\theta_2)\cdots\boldsymbol{T}_{6,7}(\theta_7) = \boldsymbol{T}_{0,1}(0)\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\boldsymbol{T}_{1,2}(0)\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\cdots\boldsymbol{T}_{6,7}(0)\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_7\theta_7} \tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{T}(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_7)$ 是末端执行器相对于基础坐标系的位姿矩阵;$\boldsymbol{T}_{i-1,i}(\theta_i)$ 是第 i 关节相对于第 $i-1$ 关节的位姿矩阵;$\boldsymbol{T}_{i-1,i}(0)$ 是第 i 关节相对于第 $i-1$ 关节的初始位姿矩阵;$\hat{\boldsymbol{w}}_4$ 为肘关节绕 y 轴旋转的运动旋量;$\hat{\boldsymbol{w}}_5,\hat{\boldsymbol{w}}_6,\hat{\boldsymbol{w}}_7$ 为腕关节分别绕三轴旋转运动旋量;$\theta_1,\theta_2,\theta_3$ 是肩关节的旋转角;θ_4 是肘关节的旋转角;$\theta_5,\theta_6,\theta_7$ 是腕关节的旋转角.

令点 A_1,B_1,C_1,D_1 是肩关节四驱动绳绳长 l_1,l_2,l_3,l_4 在基座 B 上的固定点,点 A_2,B_2,C_2,D_2 是 l_1,l_2,l_3,l_4 在肩关节运动平台 O_s 上的固定点. 有

$$\left.\begin{aligned} l_1 &= \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SA_2} + \boldsymbol{P}_{A_1S} \| \\ l_2 &= \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SB_2} + \boldsymbol{P}_{B_1S} \| \\ l_3 &= \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SC_2} + \boldsymbol{P}_{C_1S} \| \\ l_4 &= \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SD_2} + \boldsymbol{P}_{D_1S} \| \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中,矢量 $\boldsymbol{P}^o_{SA_2}$,$\boldsymbol{P}^o_{SB_2}$,$\boldsymbol{P}^o_{SC_2}$,$\boldsymbol{P}^o_{SD_2}$ 分别为肩关节 S 到 A_2,B_2,C_2,D_2 的初始矢量;$\boldsymbol{P}_{A_1S}$,$\boldsymbol{P}_{B_1S}$,$\boldsymbol{P}_{C_1S}$,$\boldsymbol{P}_{D_1S}$ 分别为 A_1,B_1,C_1,D_1 到 S 的矢量,都为已知.又已知 l_1,l_2,l_3,l_4,因此通过迭代求解此方程组可得到肩关节旋转角 θ_1,θ_2,θ_3 的解.

已知肘关节驱动绳绳长 l_5 和 l_6,肩、肘关节的耦合关系由式(3)和式(4)给出,即 l^s_5,l^s_6 可求出,则驱动绳 l_5,l_6 受自身运动影响的绳长部分 l^e_5,l^e_6 可由两者相减得到.又由图 4 可得到公式

$$l^e_5 = \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_4(-\theta_4)}\ \boldsymbol{P}_{EE_1} + \boldsymbol{P}_{E_2E} \| \tag{7}$$

$$l^e_6 = \| \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_4\theta_4}\ \boldsymbol{P}_{EF_1} + \boldsymbol{P}_{F_2E} \| \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{P}_{EE_1}$,$\boldsymbol{P}_{EF_1}$ 分别为 E 到 E_1,F_1 的矢量;$\boldsymbol{P}_{E_2E}$,$\boldsymbol{P}_{F_2E}$ 为 E_2,F_2 到 E 的矢量.

图 4 中 E 是肘关节,E_1,F_1,E_2,F_2 分别是肘关节驱动绳在平台 O_e,O_s 上的连接点.设 E_1,E_2 与 F_1,F_2 对称,E 到 E_1,F_1 与 E 到 E_2,F_2 距离相等.

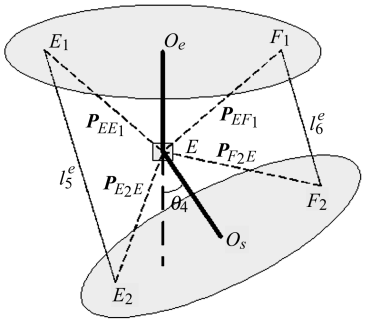


图 4　肘关节结构示意图

由于 l^e_5,l^e_6 已知,矢量 $\boldsymbol{P}_{EE_1}$,$\boldsymbol{P}_{E_2E}$,$\boldsymbol{P}_{EF_1}$,$\boldsymbol{P}_{F_2E}$ 已知,由式(7)、式(8)可计算出旋转角 θ_4.

已知绳长 l_7,l_8,l_9,l_{10},其与公式(1)中的 l^e_7,l^s_8,l^e_9,l^e_{10} 之差可解得腕关节驱动绳 l_7,l_8,l_9,l_{10} 受自身运动影响的绳长部分 l^w_7,l^w_8,l^w_9,l^w_{10},腕关节旋转角 θ_5,θ_6,θ_7 的求解与 θ_1,θ_2,θ_3 相同,由此系统的末端位姿矩阵 $\boldsymbol{T}(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_7)$ 便可求出,则系统的前向运动学求解完成.

2.3　逆向运动学分析

绳驱动机器人的逆向运动学是指已知末端执行器 F 的位姿,求解机器人的各关节驱动绳绳长 $l_1,l_2,\cdots,l_{10}$.此处采用逆向运动学求解的位置增量控制方法来求解各关节的关节角.

首先分析解耦问题,依据 2.1 中得到的分析结果由式(1)求出 l^e_7,l^s_8,l^e_9 l^e_{10},由式(3)、式(4)得到 l^s_5,l^s_6,则耦合关系求解完成.现末端执行器 F 的位姿矩阵确定,要计算系统的 7 个关节角 θ_1,θ_2,θ_3,θ_4,θ_5,θ_6,θ_7.

由于末端执行器的轨迹确定,则其运动过程中的目标位姿确定.基于逆运动学数值算法的位置增量控制算法,有

$$\boldsymbol{D}_T = \boldsymbol{J}\mathrm{d}\boldsymbol{\theta} \tag{9}$$

其中 $\boldsymbol{D}_T = -\log(\boldsymbol{T}_{0,n}(\boldsymbol{T}^d_{0,n})^{-1})^\vee \in \mathbf{R}^{6\times1}$ 是实际位姿和目标位姿之差,而 $\boldsymbol{J} = [\mathrm{Ad}_{\boldsymbol{T}_{0,1}}\boldsymbol{w}_1 \quad \mathrm{Ad}_{\boldsymbol{T}_{0,2}}\boldsymbol{w}_2 \quad \cdots \quad \mathrm{Ad}_{\boldsymbol{T}_{0,7}}\boldsymbol{w}_7] \in \mathbf{R}^{6\times7}$ 为绳驱动拟人臂机器人系统从关节空间到任务空间的雅可比矩阵[13].

由式(9)可推导出

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{D}_T \tag{10}$$

并得到迭代公式

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}^{j+1} &= \boldsymbol{\theta}^j + \mathrm{d}\boldsymbol{\theta} \\ \mathrm{d}\boldsymbol{\theta} &= \boldsymbol{J}^+\boldsymbol{D}_T \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

由上式迭代计算可得到系统各关节的关节角 θ_1,θ_2,θ_3,θ_4,θ_5,θ_6,θ_7.

然后已知各关节的关节角 θ_1,θ_2,θ_3,θ_4,θ_5,θ_6,θ_7,求解各个关节驱动绳绳长 $l_1,l_2,\cdots,l_{10}$.

求解绳长 l_5,l_6 较为简单.由肩肘耦合关系得到后,又已知 θ_1,θ_2,θ_3,则由式(3)、式(4)可求出 l^s_5,l^s_6;另式(7)、式(8)中 θ_4 已知,而矢量 $\boldsymbol{P}_{EE_1}$,$\boldsymbol{P}_{E_2E}$,$\boldsymbol{P}_{EF_1}$,$\boldsymbol{P}_{F_2E}$ 都为常量矢量,则 l^e_5,l^e_6 亦可得出.于是,绳长 l_5,l_6 可由下式求出:

$$\left.\begin{aligned} l_5 &= l^s_5 + l^e_5 \\ l_6 &= l^s_6 + l^e_6 \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

已知 θ_1,θ_2,θ_3 可求得绳长 l_1,l_2,l_3,l_4

$$\left.\begin{aligned} l_1 &= \| \boldsymbol{P}_{SA_1} + \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SA_2} \| \\ l_2 &= \| \boldsymbol{P}_{SB_1} + \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SB_2} \| \\ l_3 &= \| \boldsymbol{P}_{SC_1} + \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SC_2} \| \\ l_4 &= \| \boldsymbol{P}_{SD_1} + \mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_1\theta_1}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_2\theta_2}\mathrm{e}^{\hat{\boldsymbol{w}}_3\theta_3}\ \boldsymbol{P}^o_{SD_2} \| \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

式中,$\boldsymbol{P}^o_{SA_2}$,$\boldsymbol{P}^o_{SB_2}$,$\boldsymbol{P}^o_{SC_2}$,$\boldsymbol{P}^o_{SD_2}$,$\boldsymbol{P}_{SA_1}$,$\boldsymbol{P}_{SB_1}$,$\boldsymbol{P}_{SC_1}$,$\boldsymbol{P}_{SD_1}$ 都是常量矢量.

已知 θ_5,θ_6,θ_7 求绳长 l^w_7,l^w_8,l^w_9,l^w_{10} 的解法和上面求 l_1,l_2,l_3,l_4 的解法相同,于是,可求得 l^w_7,l^w_8,l^w_9,l^w_{10}.又已知 θ_4,由式(1)可计算得到 l^e_7,l^e_8,l^e_9,l^e_{10},则 l_7,l_8,l_9,l_{10} 可由下式求出:

$$\left.\begin{aligned} l_7 &= l^w_7 + l^e_7 \\ l_8 &= l^w_8 + l^e_8 \\ l_9 &= l^w_9 + l^e_9 \\ l_{10} &= l^w_{10} + l^e_{10} \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

式(12)~式(14)是已知系统各个旋转角 θ_1,θ_2,$\cdots$,θ_7 时各个钢绳绳长 $l_1,l_2,\cdots,l_{10}$ 的求解公

式,到此系统的逆向运动学解被求出.

3 仿真研究

机器人的参数是:从基座 B 到肩关节 S 的连杆长度是110 mm,从肩关节 S 到肘关节 E 的连杆长度是220 mm,从肘关节 E 到腕关节 W 的连杆长度是220 mm,而腕关节 W 到末端执行器 f 的距离是110 mm.各关节的运动旋量坐标如下:

$\boldsymbol{w}_1=[1,0,0,0,0,0]$ $\boldsymbol{w}_2=[0,1,0,0,0,0]$

$\boldsymbol{w}_3=[0,0,1,0,0,0]$ $\boldsymbol{w}_4=[0,1,0,0,0,0]$

$\boldsymbol{w}_5=[1,0,0,0,0,0]$ $\boldsymbol{w}_6=[0,1,0,0,0,0]$

$\boldsymbol{w}_7=[0,0,1,0,0,0]$

机器人轨迹是沿 x 轴从 $\boldsymbol{p}_0$ 点到 $\boldsymbol{p}_1$ 点的直线.

$$\boldsymbol{p}_0=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 291.4133\\ 0 & 1 & 0 & 100\\ -1 & 0 & 0 & 438.5298\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{p}_1=\begin{bmatrix}0 & -1 & 0 & -191.4133\\ 0 & 0 & 1 & 100\\ -1 & 0 & 0 & 438.5298\end{bmatrix}$$

仿真中机器人速度为 100 mm/s,加速度为 50 mm/s^2,共插补 690 步,仿真时间为 6.83 s.

仿真结果见图 5～图 10.

图 5 和图 6 是各关节的旋转角变化曲线和驱动绳的绳长变化曲线.

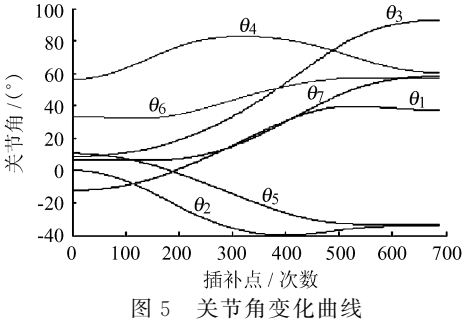


图 5 关节角变化曲线

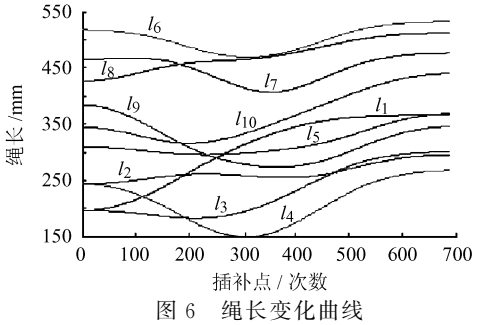


图 6 绳长变化曲线

图 7 和图 8 是末端执行器的位置和姿态变化曲线,X,Y,Z 是它分别在基础坐标系 x,y,z 轴上的变化,R_x,R_y,R_z 则是它绕基础坐标系 x,y,z 轴旋转的角度.

图 9 和图 10 分别是末端执行器的位置和姿态误差曲线,X,Y,Z,R_x,R_y,R_z 与图 7 和图 8 意义相同.

仿真中前 200 次插补做加速运动,接着 283 次插补做匀速运动,最后 200 次插补做减速运动.

由于在插补点上的误差只是数值计算的误差,而在两插补点的中间误差最大,所以图 9 和图 10 的误差曲线是在插补点的中间进行采样求解得到的.

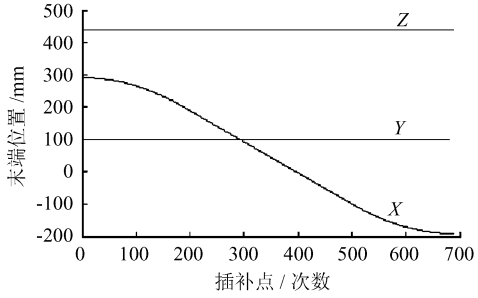


图 7 末端位置变化曲线

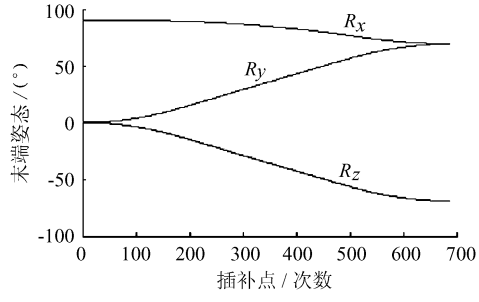


图 8 末端姿态变化曲线

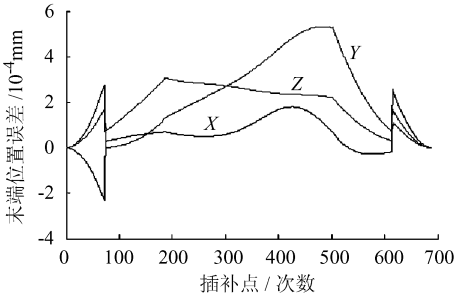


图 9 末端位置误差曲线

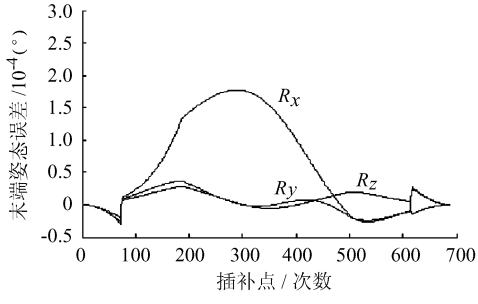


图 10 末端姿态误差曲线

4 结 束 语

设计了一种具有肘、腕关节耦合和肩、肘关节耦合,并拥有绳驱动机器人优点和冗余度机器人灵活性的绳驱动拟人臂机器人.依据几何分析,对腕、肘关节和肘、肩关节之间的耦合关系进行分析,通过机器人构型和驱动绳绳长之间的几何关系及数值算法分析,以 7 个关节角为中间变量分析机器人系统末端位姿和驱动绳绳长变化之间的关系,求解出系统运动学的正向和逆向解,并通过仿真验证了系统结构的可行性和系统的前向及逆向运动学算法的正确性.

参考文献(References)

[1] 高松海. 遥控机器人[M]. 北京:原子能出版社,1981
Gao Songhai. Romote control of robots[M]. Beijing: Atomic Energy Press,1981 (in Chinese)

[2] Grosselin C M, Wang Jing. Kinematic analysis and design of cable-driven spherical parallel mechanisms[C]//RoManSy 2004. Montreal,Canada:[s. n.],2004: 14－18

[3] Riechel A T, Imme Ebert-Uphoff. Force-feasible workspace analysis for underconstrained, point-mass cable robots[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New Orleans, LA: IEEE, 2004: 4956－4962

[4] Bosscher Paul, Imme Ebert-Uphoff. Wrench-based analysis of cable-driven robots[C]// Proceeding of the 2004 IEEE Inter Conf on Robotics & Automation. New Orleans, LA: IEEE, 2004:4950－4955

[5] Imme Ebert-Uphoff, Voglewede P A. On the connections between cable-driven robots, parallel manipulators and grasping[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation. New Orleans, LA: IEEE, 2004:4521－4526

[6] Albus J, Bostelman R, Dagalakis N, et al. Nist robocrane [J]. Journal of Robotic System, 1993,10(5): 709－724

[7] Homma Keiko, Fukuda Osamu, Nagata Yoshihiko, et al. Study of a wire-driven leg rehabilitation system[C]// Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Inter Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2002

[8] Kawamura S, Ida M, Wada T, et al. Development of a virtual sports machine using a wire drive system—a trial of virtual tennis[C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pittsburgh, PA,USA:IEEE, 1995, 1: 111－116

[9] Ming Aiguo, Higuchi Toshiro. Study on multiple degree-of-freedom positioning mechanism using wires [J]. Inter J Japan Soc Prec Eng, 1994,28(2):131－138

[10] 钱锡康. BUAA-RR 七自由度机器人机械结构设计[J]. 北京航空航天大学学报,1998,24(3):354－357
Qian Xikang. Mechanical configuration design for BUAA-RR seven degree-of-freedom robot[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998,24(3): 354－357(in Chinese)

[11] Yang Guilin, Lin Wei, Kurbanhusen M S, et al. Kinematic design of a 7-DOF cable-driven humanoid arm: a solution-in-nature approach[C]// Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, California, USA: IEEE, 2005 (7):24－28

[12] Zollo L, Siciliano B, Laschi C, et al. An impedence-compliance control for a cable-actuated robot [C]// 2002 IEEE/RSJ Inter Conf On Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2002, 2268－2273

[13] Chen I M, Yang G L. Inverse kinematics for modular reconfigurable robots [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, Belgium: IEEE, 1998:1647－1652

(责任编辑:娄　嘉)